Conseil national de recherches Canada

Institut de recherche en construction

National Research Council Canada

Institute for Research in Construction

Les fenêtres : performance et technologie de pointe

COMPTE RENDU DU REGARD 88 SUR LA SCIENCE DU BÂTIMENT

Canada

89-03242/

Les fenêtres : performance et technologie de pointe

Compte rendu du Regard 88 sur la science du bâtiment

NRCC 29348F
ISSN 0835–6548
Compte rendu n° 15
Ottawa, août 1988
© Conseil national de recherches du Canada 1988

On trouvera ici le compte rendu du Regard 88 sur la science du bâtiment, série de séminaires d'une journée sur les fenêtres présentés à l'automne dans différentes villes du Canada. Il s'agissait de la 28e édition annuelle de séminaires-ateliers organisés par l'IRC depuis les années soixante. Les séminaires ont été présentés à St. John's, Halifax, Moncton, Québec, Montréal, Ottawa, Toronto, London, Winnipeg, Regina, Edmonton, Calgary, Kelowna et Vancouver.

Nous tenons à remercier Armand Patenaude, président de Air-Ins. Inc., laboratoire d'essai de composants du bâtiment affilié au Groupe Trow. Des membres de l'Association canadienne des manufacturiers de fenêtres et de portes et de l'Association canadienne de manufacturiers de vitrage isolant ont aussi participé utilement aux discussions de l'après-midi.

Table des matières

Performance des fenêtres : un tour d'horizon 1

M.Z. Rousseau

Facteurs de performance des fenêtres 17

W.C. Brown et K. Ruberg

Normes sur la performance globale des fenêtres 31

A.H. Elmahdy et A. Patenaude

Intégration de la fenêtre à l'enveloppe du bâtiment 49

A. Patenaude, D. Scott et M. Lux

Technologie de pointe dans l'industrie de la fenêtre 63

A.H. Elmahdy et S.M. Cornick

Performance des fenêtres : un tour d'horizon

M. Z. Rousseau

Qu'est-ce qu'une fenêtre?

Les fenêtres jouent un rôle prépondérant au niveau de la qualité de vie et du confort dans les bâtiments. Pour l'occupant, les fenêtres laissent entrer la lumière, la chaleur du soleil et l'air frais, et donnent une vue sur le monde. Pour l'architecte et le concepteur, les fenêtres donnent du caractère à la façade, rompent la continuité d'un mur ou d'une toiture et nécessitent un soin particulier à l'assemblage. Pour l'ingénieur en mécanique, elles sont causes de surchauffe, de refroidissement ou d'infiltration d'air. Pour le constructeur, les fenêtres sont le point de rencontre de matériaux différents et de corps de métiers différents. Pour l'ingénieur de protection incendie, les fenêtres peuvent servir d'issue en cas d'incendie, offrir un chemin à la propagation des flammes aux autres étages ou bâtiments, et alimenter le feu en air. Pour l'expert-conseil, les fenêtres pourraient bien être sources de revenues car elles peuvent être liées directement ou indirectement à des défauts de performance. Comme on peut le constater, les fenêtres n'ont pas la même connotation pour tous. À l'instar des autres composantes de l'enveloppe du bâtiment, la fenêtre filtre les conditions entre l'intérieur et l'extérieur; en outre, elle peut être ouvrable et laisse passer, jusqu'à un certain point, la lumière naturelle. On peut la décrire comme tout ce qui nous permet de voir au travers : le vitrage d'une porte-patio d'une habitation ou un mur–rideau commercial, un lanterneau, un vitrage incliné et, bien sûr, la fenêtre traditionnelle au-dessus de votre évier de cuisine.

Jamais n'a-t-on vu une telle variété de fenêtres sur le marché. Cette prolifération est due aux multiples combinaisons de vitrage, d'enduits, de matériaux et de profilés pour dormant et châssis de même qu'aux options offertes par la nouvelle technologie. Cette série d'exposés traite principalement des systèmes préfabriqués posés dans l'enveloppe du bâtiment; certaines des questions relatives à la performance porteront cependant sur les systèmes assemblés sur place ou sur les systèmes de vitrage, comme les murs–rideaux par exemple. Le présent exposé examine la nature des exigences relatives aux fenêtres de trois points de vue : comme système d'éléments, comme partie intégrante de l'enveloppe du bâtiment et comme partie intégrante du milieu intérieur. Il décrit également la collection de fenêtres et d'éléments de fenêtres sur le marché. Le deuxième exposé *Facteurs de performance des fenêtres* examine les exigences en matière de performance qu'il faut considérer lors du choix des fenêtres. Le troisième exposé *Normes sur la performance globale des fenêtres* porte exclusivement sur la norme canadienne sur les fenêtres; il passe en revue ses articles et méthodes d'essais, de même que les ajouts éventuels. Le quatrième exposé *Intégration de la fenêtre à l'enveloppe du bâtiment* traite de l'installation des fenêtres dans les habitations et les établissements commerciaux ainsi que de la façon d'assurer la continuité des fonctions à la jonction mur–fenêtre. Quant au dernier exposé *Technologie de pointe dans l'industrie de la fenêtre*, il présente les technologies nouvelles comme le vitrage structural, les enduits à faible émissivité et le vitrage scellé dont la(les) cavité(s) sont remplie(s) de gaz.

Quels sont les facteurs influant sur la performance des fenêtres?

La performance des fenêtres comporte trois grands aspects : les caractéristiques physiques de la fenêtre en tant qu'ensemble de matériaux de construction, chacun d'entre eux jouant divers rôles; la jonction physique de la fenêtre avec l'enveloppe dont elle devient partie intégrante, et enfin les effets des fenêtres sur la qualité de l'ambiance intérieure et le confort des occupants.

Les fenêtres sont probablement la composante assemblée en usine la plus courante de l'enveloppe du bâtiment. En tant que telle, elles constituent un

ensemble de matériaux qui, comme système, doit remplir les mêmes fonctions que les murs opaques, et plus encore (Figure 1). En plus de limiter l'écoulement de chaleur, la transmission du son, le passage de l'air et de la pluie, les fenêtres doivent transmettre la lumière sans causer d'éblouissement, laisser entrer l'air frais sans laisser entrer les insectes ni causer de courant d'air, être étanches à l'air mais faciles à manœuvrer, laisser pénétrer la chaleur du soleil en hiver dans les habitations, mais non en été (pour tous les bâtiments). Tous ces facteurs rendent leur conception et l'évaluation de leur performance plutôt complexes. Certaines fenêtres obtiennent une meilleure performance que d'autres même si elles peuvent toutes respecter les normes canadiennes. Par exemple, certaines exigences de la norme canadienne sur les fenêtres[1] comportent trois niveaux de performance. Il revient au rédacteur de devis de décider quelles conditions présentes lors des essais en laboratoire correspondront vraisemblablement aux conditions réelles sur le terrain. Le rédacteur de devis devra peut-être même exiger un niveau de performance supérieur au niveau le plus élevé dicté dans la norme : par exemple, dans les Maritimes, les pressions du vent accompagnées de pluie peuvent être plus fortes que les pressions auxquelles sont soumises les fenêtres dans les essais conformes à la norme canadienne sur les fenêtres. En outre, cette norme ne vise pas tous les critères de performance car elle ne tient pas compte, entre autres, de la résistance thermique et de la transmission du son. L'évaluation des risques de condensation n'est exigée que pour les fenêtres en aluminium; pourtant il peut aussi se former de la condensation sur les fenêtres mal conçues, peu importe le matériau du dormant. À moins

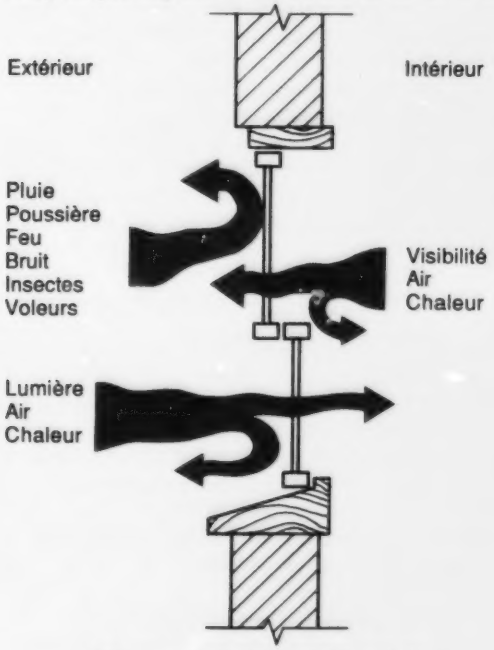


Figure 1. La fenêtre agit à titre de filtre.

d'évaluer les fenêtres en fonction de ces exigences, il sera difficile de comparer les produits de façon satisfaisante. Les nombreux aspects de la performance de la fenêtre prise comme un ensemble d'éléments font l'objet des deuxième et troisième exposés, ce dernier portant en particulier sur les normes canadiennes traitant des fenêtres et de leurs composantes.

Une fois les fenêtres choisies, il faut ensuite concevoir les détails de leur assemblage à la structure principale. On n'insistera jamais assez sur l'importance d'une jonction mur–fenêtre correctement détaillée. D'ailleurs, cette jonction entre souvent en jeu dans les problèmes de murs et de fenêtres. L'exfiltration d'air au joint mur–fenêtre peut entraîner l'apparition d'efflorescence sur les revêtements de brique, ou de petits glaçons aux joints entre les panneaux de béton préfabriqué, ou la pourriture d'un mur à ossature de bois sous la fenêtre, causée par la pénétration d'une «eau de condensation» dans le mur lors d'une période de temps doux en hiver. L'infiltration d'air par temps doux peut pousser la pluie à l'intérieur, laquelle se manifeste à la tête de la fenêtre (une certaine quantité d'eau doit également pénétrer à l'appui, mais elle «disparaît» dans le mur et ne paraît pas à l'intérieur du bâtiment). L'infiltration d'air froid peut refroidir les surfaces intérieures en dessous du point de rosée de l'air ambiant et par conséquent favoriser la condensation superficielle. Une isolation non continue, l'infiltration d'air à la jonction mur–fenêtre (Figure 2) et une fenêtre située vis-à-vis les matériaux froids du mur peuvent refroidir la rive des dormant et châssis, accroître la condensation de surface et, dans certains cas, augmenter les risques de bris d'origine thermique. Contrairement à la croyance populaire, un bon assemblage à l'épreuve des intempéries ne consiste pas seulement à jointer la face extérieure du dormant au revêtement extérieur avec un produit de calfeutrage et à remplir la cavité avec un isolant fibreux. L'assemblage mécanique de la fenêtre et de l'ouverture brute pratiquée dans le mur est également cruciale pour assurer le transfert adéquat des charges de vent à la structure. L'étanchéité à l'air est la solution clé pour éviter la condensation interstitielle et la pénétration de la pluie, et une façon d'y parvenir avec succès consiste à évaluer le mouvement des joints en vue de choisir le produit d'étanchéité le plus approprié. Les solins, les déflecteurs de pluie et le drainage de la cavité complètent l'installation soignée des fenêtres. Ces questions sont entre autres abordées dans le quatrième exposé.

Les fenêtres ont également un impact sur l'ambiance intérieure. Leurs caractéristiques thermiques et optiques, leur dimension, leur orientation, leur mobilité de même que leur traitement avec des écrans pare-soleil influent sur le confort des occupants et le fonctionnement des installations mécaniques. L'éblouissement, la surchauffe et le refroidissement, les

courants d'air et le bruit extérieur nuisent au confort physique tandis que la communication – ou le manque de communication – avec le monde extérieur peut nuire au bien-être psychologique. La quantité, le type et l'emplacement des vitrages sont tous des facteurs qui, pour assurer la satisfaction des occupants, doivent être pris en considération lors de l'évaluation des options de la conception. (Le confort et la satisfaction du client deviennent maintenant acceptés comme parties intrinsèques de la performance globale du bâtiment, et les fenêtres y ont certainement leur rôle à jouer.) Le chauffage, le refroidissement, l'humidification et l'éclairage de l'espace sont les meilleurs exemples d'installations touchées par la conception et le fonctionnement de la fenêtre. Par exemple, les fenêtres ouvrantes sont le cauchemar des ingénieurs en mécanique mais le paradis sur terre des occupants qui se sentent davantage maîtres de leur environnement. De plus, l'installation de fenêtres plus étanches dans les bâtiments existants influe sur le climat intérieur : il faudra alors peut-être augmenter le débit de la ventilation mécanique pour compenser la réduction des fuites d'air, diminuer le débit des humidificateurs et réduire la dimension des installations de chauffage.

Quelles sont les exigences relatives aux fenêtres?

Nos attentes concernant les fenêtres se sont accrues au cours des années et, en plus, les conditions d'exposition sont devenues plus rigoureuses. Nos grands-mères vivaient dans des maisons dont les fenêtres laissaient passer les courants d'air et où l'air était sec; aujourd'hui, nous voulons des maisons où l'air est humide, dont les fenêtres à haut rendement énergétique ne présentent aucune condensation et le tout, à bon prix.

Comme on peut le constater, ces exigences portent non seulement sur les fenêtres mais aussi sur le milieu qu'elles créent à l'intérieur. Les exigences en matière de performance des fenêtres sont les suivantes :

- limiter l'écoulement de chaleur,
- limiter l'écoulement d'air,
- limiter l'écoulement de vapeur d'eau,
- limiter la condensation,
- empêcher la pénétration de la pluie et de la neige,
- limiter l'entrée du rayonnement solaire et autres,
- limiter la transmission du son,
- empêcher l'entrée des insectes,
- lutter contre la propagation du feu,
- servir d'issues de secours en permanence,
- résister à l'entrée par effraction,
- être faciles à manœuvrer par tous,
- être résistantes et solides,
- maintenir une performance satisfaisante pour toute la durée en service,
- être esthétiques et bien cadrer avec l'environnement,
- être économiques.

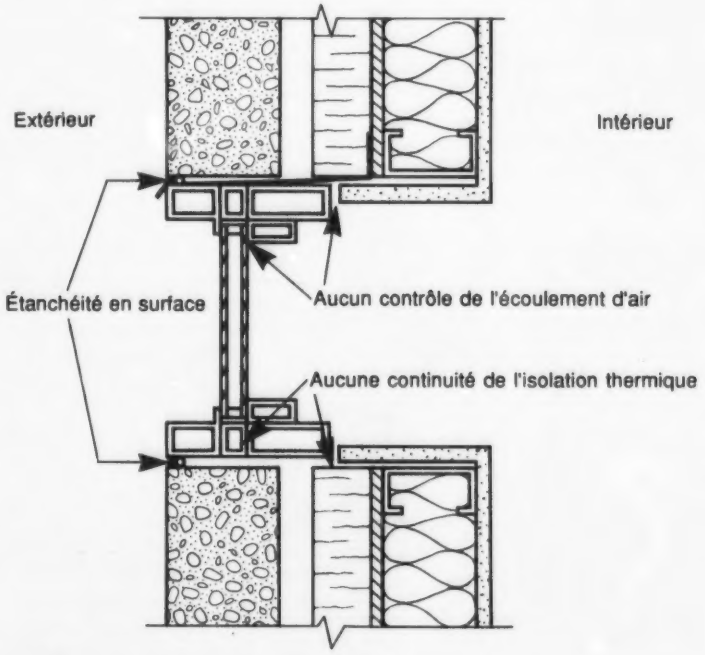


Figure 2. Discontinuité des fonctions à la jonction mur–fenêtre.

La plupart des exigences en matière de performance de la fenêtre en tant que système sont brièvement décrites dans les pages suivantes.

Écoulement de chaleur

C'est une tâche complexe que de limiter l'écoulement de chaleur. La chaleur peut pénétrer à l'intérieur lors des journées chaudes et ensoleillées, et accroître ainsi la température intérieure et les coûts de conditionnement d'air (le cas échéant). Mais la chaleur peut également s'échapper du bâtiment, en quantité qui varie selon la résistance thermique des composantes de la fenêtre. La résistance thermique du vitrage est déterminée par la lame d'air entre les vitres et par les films d'air sur les surfaces intérieure et extérieure de l'ensemble qui ralentissent le transfert de chaleur (Figure 3). Le verre lui-même offre très peu de résistance à l'écoulement de chaleur. Les plus récentes découvertes mises sur le marché relativement à l'augmentation de la valeur RSI du vitrage sont les enduits à faible émissivité appliqués sur le verre ou le plastique pour réduire l'écoulement de chaleur rayonnée par les objets ou les occupants du local, et les gaz remplaçant l'air dans les cavités des vitrages scellés.

Bon nombre de nouveaux produits destinés à contrôler la radiation solaire sont apparus sur le marché au cours des vingt dernières années. Les verres athermanes et les verres dotés d'un enduit réfléchissant, qui sont des verres sensibles à une longueur d'onde particulière du spectre d'énergie solaire, sont principalement utilisés dans les établissements commerciaux. Quant aux verres dotés d'un enduit limitant la pénétration des rayons ultraviolets, cause de la décoloration des tissus, ils connaissent une popularité croissante sur le marché de l'habitation. Comme il sera fait mention dans le deuxième exposé, le vitrage sert à filtrer l'énergie, qu'il s'agisse de l'énergie solaire, de

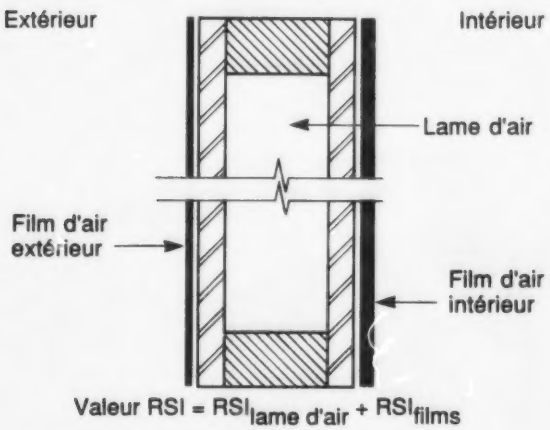


Figure 3. Valeur RSI d'un vitrage double.

l'énergie rayonnée par les objets ou les humains ou de l'énergie des ondes sonores.

Dans certains cas (dans les bâtiments à valeur patrimoniale par exemple), il faudra peut-être améliorer les fenêtres plutôt que les remplacer. Un film adhésif peut être appliqué sur la vitre existante pour contrôler les gains de chaleur solaire, réduire les pertes de chaleur intérieure et ainsi améliorer la performance thermique de la fenêtre.

Écoulement d'air

Les fenêtres doivent résister à l'écoulement d'air, sinon la consommation d'énergie et le confort s'en trouvent affectés et il y a risque de condensation. Puisque les matériaux eux-mêmes ont une perméabilité à l'air plutôt faible, il faut accorder une attention particulière à leurs points de rencontre. Les produits d'étanchéité adhésifs et les garnitures sèches sont utilisés pour les parties fixes de la fenêtre, tandis que les coupe-froid sont employés pour les parties ouvrantes.

Pour étanchéiser la jonction vitrage–châssis, on utilise des produits soit adhésifs ou soit à sec (de compression); ces produits devraient être compatibles avec le produit d'étanchéité du vitrage scellé. L'étanchéité des fenêtres de bois est habituellement assurée au moyen d'un produit adhésif. Les produits d'étanchéité adhésifs sont appliqués en général sous forme de cordon de surface du côté extérieur du joint; la pose de produits similaires du côté intérieur du joint en cordon de surface et cordon de fond est aussi importante (Figure 4). Le cordon de fond intérieur est, en réalité, le produit de calfeutrage qui assure l'étanchéité à l'air de l'ensemble; les autres joints empêchent l'entrée directe de l'eau de pluie ou de condensation. Pour les châssis de vinyle et d'aluminium, on utilise des produits adhésifs et à sec : un profilé préformé élastomérique de compression peut être posé comme cordon de surface sur un côté du vitrage, ou les deux côtés, tandis qu'un cordon de fond intérieur adhésif assure l'étanchéité à l'air entre le vitrage et le châssis (Figure 5). Le cordon de fond intérieur ne fait pas partie intégrante de toutes les fenêtres sur le marché et par conséquent, il constitue un critère de sélection.

Les parties ouvrantes de la fenêtre peuvent quant à elles être dotées d'une grande variété de coupe-froid. La forme et le matériau utilisés dépendent du mode de fonctionnement de la fenêtre. Par exemple, dans le cas d'une fenêtre pivotante (à battant ou auvent), le coupe-froid peut être tubulaire, en PCV plastifié ou en caoutchouc synthétique comme le EPDM (monomère d'éthylène, propylène et diène), ou être tout simplement droit. Même si les coupe-froid se trouvent sous diverses formes, ils fonctionnent tous sous le même principe : le

matériau est comprimé lorsque le châssis est fermé. Dans le cas d'une fenêtre coulissante, on utilise en général des bandes en V de métal, de PCV ou de EPDM ainsi que des garnitures sous forme de brosses en fibres synthétiques.

Écoulement de la vapeur d'eau

Pour limiter l'écoulement de la vapeur d'eau à travers une fenêtre, il faut limiter l'écoulement de l'air, puisque la diffusion de la vapeur à travers la plupart des matériaux composant les fenêtres (aluminium, acier, verre, PCV, bois imperméabilisé) est très faible. Par exemple, dans le cas d'un vitrage double non scellé, l'exfiltration d'air humide, plutôt que la diffusion d'humidité, peut causer la condensation entre les vitres (Figure 6). On peut réduire l'ampleur du problème en améliorant l'étanchéité à l'air du châssis intérieur existant ou à défaut de mieux, en ouvrant légèrement le châssis extérieur.

Condensation

Il est également important de limiter la condensation : non seulement entrave-t-elle la visibilité mais l'eau de condensation peut détériorer le châssis, le dormant et l'appui de même que le revêtement de finition intérieur et l'allège. Lorsque la température

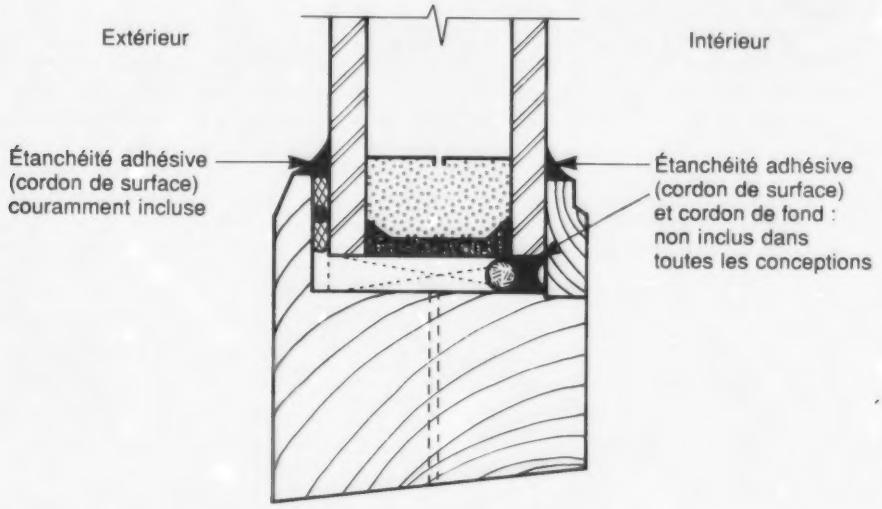


Figure 4. Étanchéité adhésive à la jonction vitrage–châssis de bois.

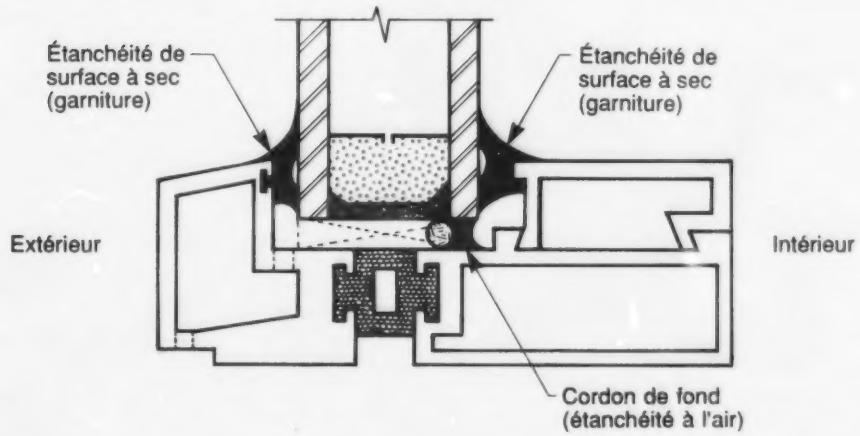


Figure 5. Étanchéités adhésive et à sec à la jonction vitrage–châssis d'aluminium.

d'une surface tombe en dessous du point de rosée de l'air environnant, l'humidité se condense sur cette surface. Il semble que les plaintes concernant la condensation sur les fenêtres soient plus fréquentes pour les habitations que les établissements commerciaux. L'humidité relative de l'air ambiant et la température du vitrage, du châssis et du dormant sont les deux éléments sur lesquels il faut se pencher pour résoudre le problème. Si l'on veut réduire le niveau d'humidité de l'air ambiant, il faut restreindre les sources d'humidité (activités des occupants, humidificateurs, sol, bois de chauffage, etc.) et(ou) augmenter la ventilation. Plusieurs stratégies peuvent être employées pour

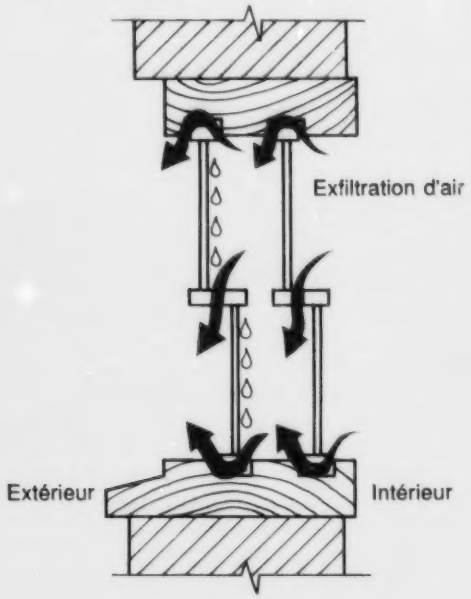


Figure 6. Condensation entre les vitres d'un vitrage non scellé.

accroître la température de la surface intérieure des fenêtres. On peut augmenter la valeur RSI de la fenêtre en ajoutant un espace d'air créé au moyen d'une vitre supplémentaire ou d'une feuille de plastique posée du côté intérieur et couvrant toute la fenêtre ou le vitrage seulement. On peut aussi accroître la circulation d'air chaud du local près des fenêtres à l'aide de ventilateurs ou en enlevant les barrières telles que les rideaux épais, les déflecteurs d'air, les gros meubles devant les fenêtres et les bouches de chaleur ou les radiateurs.

L'installation de fenêtres plus étanches dans un bâtiment existant augmente son étanchéité à l'air, mais accroît aussi l'humidité relative à l'intérieur. Par conséquent, les risques de condensation se trouvent accrus; en donnant une meilleure performance que les fenêtres précédantes, les nouvelles fenêtres sont davantage sujettes à la condensation. La cause réelle réside souvent dans un changement d'équilibre entre les taux de ventilation et de production d'humidité, et dans une connaissance insuffisante de l'interaction entre les systèmes du bâtiment.

Pénétration de la pluie

Il est possible d'empêcher la pluie de pénétrer en installant un écran pare-pluie aux jonctions châssis–unité de vitrage et châssis–dormant. Le principe de l'écran pare-pluie est fondé sur le contrôle des forces qui poussent l'eau dans les petites ouvertures plutôt que sur l'élimination des ouvertures elles-mêmes. Ces forces sont l'énergie cinétique des gouttes de pluie, la gravité, la capillarité et la différence de pression d'air. Étant donné qu'une différence de pression d'air entre l'extérieur du bâtiment et les cavités d'air dans les fenêtres constitue une force importante causant l'infiltration d'air et de là, la pénétration de l'eau, un meilleur contrôle de cette pression différentielle réduit le

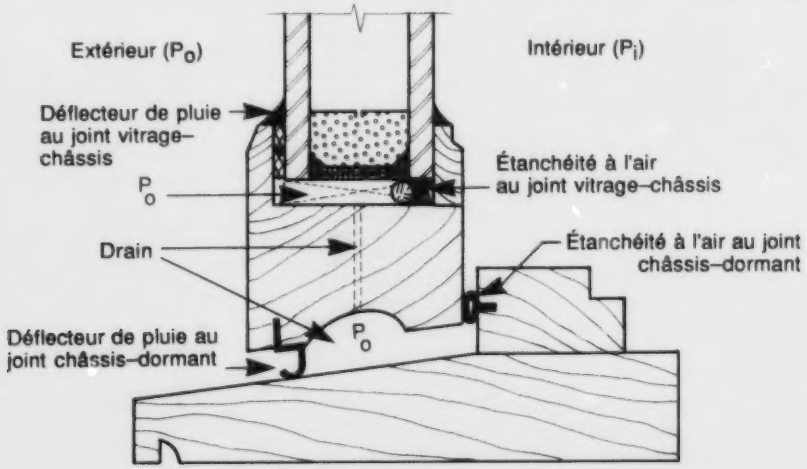


Figure 7a. Fenêtre de bois avec écran pare-pluie, coupe verticale de l'appui.

problème. Pour obtenir un équilibre de la pression d'air entre la cavité de ces jonctions et l'extérieur du bâtiment, il doit y avoir une étanchéité à l'air à l'intérieur de la cavité et un déflecteur de pluie à l'extérieur; la cavité doit communiquer avec l'extérieur et être drainée (Figures 7a et 7b). Cependant, certaines fenêtres ont été conçues selon la méthode de «colmatage en surface» (aucun joint d'étanchéité à l'intérieur), qui consiste à boucher toutes les ouvertures présentes à la surface extérieure de la fenêtre plutôt qu'à contrôler les forces qui poussent l'eau dans ces ouvertures. Cette méthode n'est efficace que pendant un certain temps et la fenêtre nécessitera un entretien fréquent.

Transmission du son

La transmission du son à travers les fenêtres peut être contrée au moyen de cavités profondes entre les parois (vitrage multiple), de parois lourdes (vitres plus épaisses) et d'une réduction du lien structural entre les parois (dormants et châssis distincts pour les parois intérieures et extérieures). Les fenêtres doivent de toute évidence être aussi étanches à l'air que possible : les fenêtres fixes offrent habituellement un meilleur contrôle de la transmission du son que les fenêtres ouvrantes.

Entrée des insectes

Les fenêtres ouvrantes doivent être munies de moustiquaires afin d'empêcher les insectes d'entrer. Il est primordial que ces moustiquaires soient bien ajustées pour remplir leur fonction adéquatement. La norme canadienne sur les fenêtres exige que les dormants des fenêtres ouvrantes soient conçus de façon à contenir des moustiquaires qui leur sont destinées; toutefois, il existe aucune exigence concernant la façon dont elles devraient être ajustées aux dormants. L'observation et le bon sens indiqueront celles qui ne laissent pas pénétrer les insectes, sont faciles à ôter pour le nettoyage puis à réinstaller.

Facilité d'opération

La facilité avec laquelle les fenêtres sont manœuvrables est parfois en contradiction avec les exigences d'étanchéité à l'air et au son. Étant donné la population canadienne vieillissante, il importe de concevoir des fenêtres pour les personnes ayant une force physique restreinte. Le mécanisme d'opération de la fenêtre et sa quincaillerie, de même que les mouvements dus aux conditions thermiques et d'humidité des matériaux du châssis et du dormant ont un effet sur la manœuvrabilité de la fenêtre.

Solidité et durabilité

Le verre est un matériau fragile qui casse sous tension. Même s'il peut obtenir une résistance à la traction de 6900 MPa, il peut se briser sous des contraintes beaucoup plus faibles en raison des imperfections en surface; certaines d'entre elles sont inhérentes au procédé de fabrication et certaines autres sont provoquées mécaniquement. Afin de le rendre solide et résistant à la rupture, et de faire en sorte que le verre cassé reste dans son cadre, divers types de verre ont été mis au point : trempé, semi-trempé, armé et laminé. Voyons maintenant leurs caractéristiques.

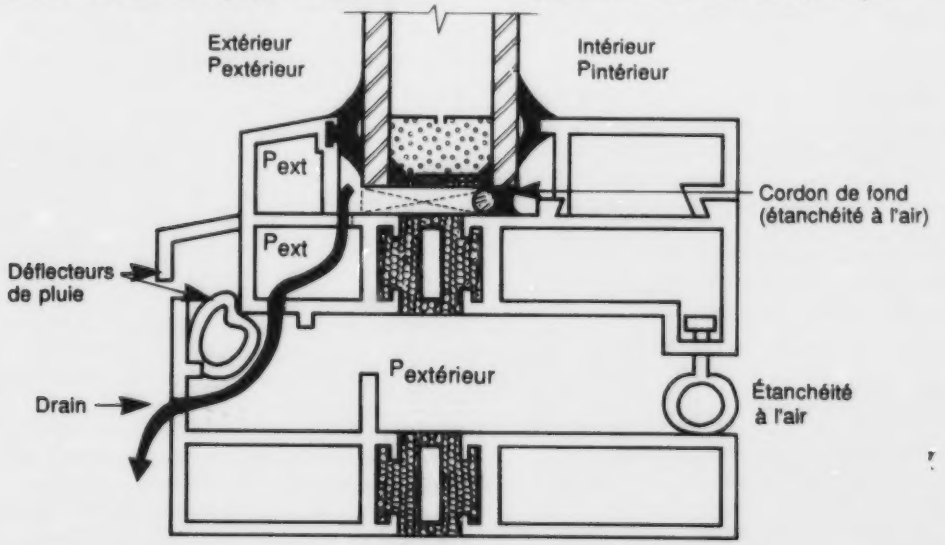


Figure 7b. Fenêtre d'aluminium avec écran pare-pluie.

Le verre *trempé* est fondamentalement un sandwich de verre en contrainte : les deux faces sont en contrainte de compression et le cœur en contrainte de tension. La façon de renforcer le verre consiste à le chauffer jusqu'à ce que sa température atteigne environ le point de fusion, puis à le refroidir rapidement. Ainsi, les faces refroidissent et se contractent alors que l'intérieur du verre est encore tiède. Lorsque l'intérieur se contracte à son tour, les faces sont rigides et comprimées par la contraction de l'intérieur. Par conséquent, toute contrainte de tension imposée sur le verre doit vaincre la contrainte de compression initiale avant de porter atteinte au verre en contrainte de tension. Ce verre possède donc une résistance au bris par flexion, impact ou choc thermique de 3 à 5 fois plus forte que le verre recuit. La faiblesse du verre trempé réside par contre dans la fragilité de son périmètre : un choc léger produit par un objet pointu peut en causer le bris. Ce verre doit également être taillé avant la trempe, sinon la feuille de verre s'émiettera.

Le verre *semi-trempé* subit un traitement thermique semblable à celui employé dans le cas du verre trempé, mais la température et les vitesses de refroidissement amoindrissent la compression en surface. Ce verre peut être utilisé pour remplacer le verre recuit lorsque le verre doit de préférence avoir une résistance à la rupture et une résistance thermique supplémentaires.

Le verre *armé* comporte un treillis de fils de fer inséré dans le verre fondu pendant sa fabrication. On le considère deux fois moins résistant que le verre flotté de même épaisseur et il ne peut être trempé ni semi-trempé. Son principal avantage réside dans son armature qui, après le bris du verre, retient les morceaux ensemble. On se sert du verre armé dans les séparations coupe-feu, pour la protection contre les voleurs et dans les endroits à risques exigeant une protection contre la fragmentation du verre.

Le verre *laminé* consiste en deux feuilles ou plus de verre collées ensemble au moyen de films de plastique intercalés. Le verre laminé n'est pas plus résistant à la rupture que le verre monolithique mais, en cas de bris, la couche de plastique intercalée maintient les fragments en place.[2] Cette combinaison de verre et de films de plastique peut être utilisée à plusieurs fins : pour bloquer la transmission du son, limiter le chauffage solaire, et résister aux balles et aux explosions.

Propagation du feu

Étant donné que le vitrage est jugé comme une composante de l'enveloppe offrant peu de résistance à la propagation du feu aux autres étages ou autres bâtiments, le Code national du bâtiment pose une limite à la surface des fenêtres selon l'occupation de l'espace, la distance à la limite de propriété ou la distance limitative et la géométrie de la façade. Les nouvelles mises au point concernant des fenêtres munies d'extincteurs automatiques à eau en vue de prévenir la propagation du feu seront présentées dans le cinquième exposé *Technologie de pointe dans l'industrie de la fenêtre*.

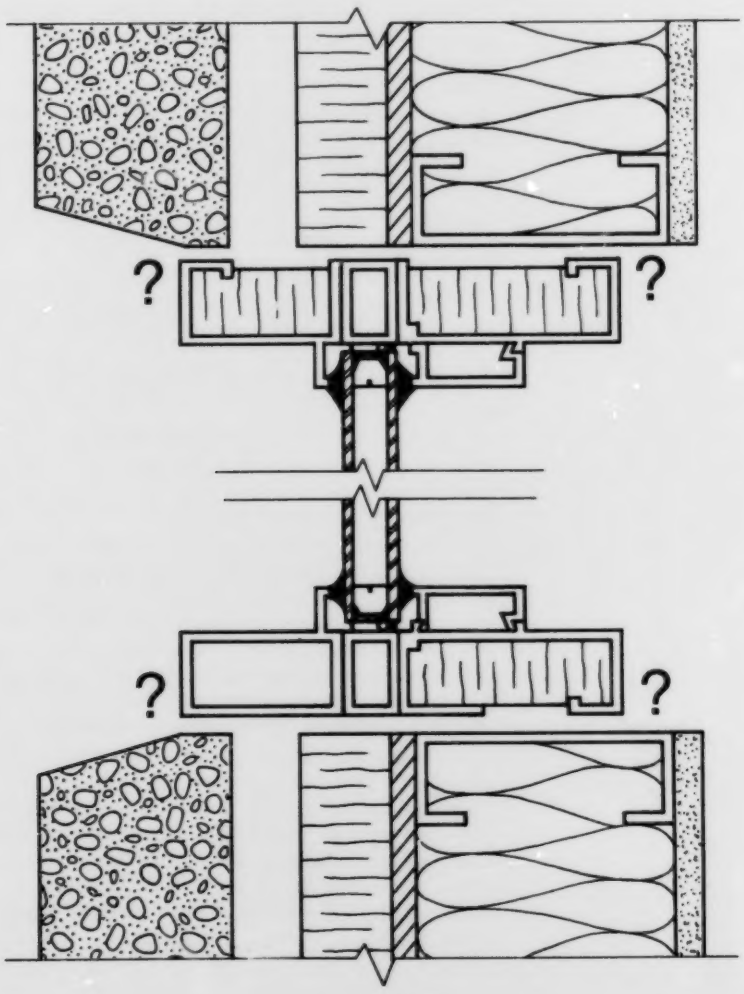
Quelles sont les exigences relatives à la jonction mur–fenêtre?

Les détails de la jonction mur–fenêtre sont primordiaux pour assurer la continuité des fonctions dans l'enveloppe. Malheureusement, on s'en préoccupe peu aux étapes de la conception et de la construction. Trop souvent, ils ne sont établis qu'à la dernière minute, lorsque les fenêtres sont arrivées sur le chantier et qu'il faut les poser. Le petit «vide» entre l'ouverture brute et le dormant de la fenêtre peut menacer la performance de tout le système mais, pour une raison quelconque, on ne lui porte guère attention. Les problèmes de pénétration de la pluie, d'infiltration d'air ou d'efflorescence sur la maçonnerie peuvent provenir d'une discontinuité des fonctions de l'enveloppe autour des fenêtres (plutôt qu'à travers celles-ci). Les concepteurs doivent clairement identifier le plan d'étanchéité à l'air de la fenêtre et des murs afin que les composantes puissent être jointes adéquatement (Figure 8). Outre les produits d'étanchéité et les garnitures compressibles, des nouvelles familles de produits connaissent une popularité grandissante. Les membranes élastomères adhésives utilisées comme pare-air dans les murs des bâtiments de grande hauteur assurent également l'étanchéité de la jonction mur–dormant de la fenêtre. Par extension, des bandes de ces membranes joignent au pare-air du dormant d'autres matériaux agissant comme pare-air du mur. On utilise aussi la mousse de polyuréthane pulvérisée car elle fournit à la fois une isolation thermique et une étanchéité à l'air; toutefois, il faut bien tenir compte du mouvement qu'elle peut subir, son adhérence à divers subjectiles de même que le risque de transfert des charges verticales au-dessus de la fenêtre en cas de tassement du mur.

Le principe de l'écran pare-pluie peut également être appliqué à la jonction mur–fenêtre afin de réduire l'entretien des joints et obtenir une meilleure performance. Outre l'examen des façons d'étancher la jonction mur–fenêtre, l'exposé *Intégration de la fenêtre à l'enveloppe du bâtiment* traite de la liaison mécanique de la fenêtre au mur et de son incidence sur le mouvement du joint. La connection structurale entre la fenêtre et le mur est cruciale pour assurer le transfert approprié des charges dues au vent et autres à la structure. Il arrive fréquemment que la tête de la fenêtre ne soit attachée d'aucune façon au linteau; cette lacune tend à

augmenter le risque de déplacement du dormant de la fenêtre par rapport à l'ouverture brute. L'emplacement des points d'ancrage influent aussi sur l'expansion et la contraction du joint et sur le choix des matériaux de calfeutrage.

L'installation de nouvelles fenêtres dans un bâtiment existant est probablement plus complexe que l'installation des fenêtres dans un nouveau bâtiment, car il faut s'accommoder de ce qui a déjà été fait et on ne sait pas toujours à quoi s'attendre avant de prendre les décisions. Par exemple, la jonction mur–fenêtre devrait être étanche à l'air et il devrait de toute évidence exister un plan d'étanchéité dans le mur, chose peu probable dans la plupart des vieux bâtiments. À quoi doit-on joindre le dormant de la fenêtre? Cette difficulté explique certainement pourquoi tant de bâtiments améliorés ont subi un colmatage en surface à l'extérieur sans être étanchés à l'intérieur d'aucune façon; il est possible que les nouvelles fenêtres laissent pénétrer la pluie en raison de ce compromis. Lorsque l'on veut remplacer les fenêtres en bois des bâtiments existants (établissements commerciaux, habitations, établissements institutionnels), les décisions suivantes doivent être prises avec soin : doit-on enlever ou garder le dormant de bois existant? doit-on insérer le nouveau dormant dans l'ouverture brute du mur ou dans le dormant existant? (Figure 9). Bien souvent, le nouveau dormant est inséré dans le dormant précédant, ces deux derniers étant recouverts à l'extérieur avec une feuille



- *Qu'est-ce que le pare-air de mur?*
- *Où se trouve le plan d'étanchéité à l'air dans la fenêtre?*
- *Quelle méthode utilisera-t-on, l'écran pare-pluie ou l'étanchéité en surface?*
- *De quelle largeur doit être le joint et quels matériaux d'étanchéité doit-on utiliser?*

Figure 8. Jonction mur–fenêtre : que faut-il jointer et comment?

d'aluminium et étanchés en surface. Le principe de l'écran pare-pluie n'est donc pas appliqué et la dimension du vide autour de la fenêtre a doublé, accroissant ainsi les fuites d'air à la jonction mur–fenêtre.

La compréhension et la connaissance du résultat désiré, de l'ordre des opérations de construction de même que de la façon de concevoir les détails pour qu'ils soient réalisables sont de prime importance. Les corps de métiers qui y travaillent doivent également comprendre pourquoi il importe tant de suivre ce procédé plutôt que celui qu'ils ont suivi pendant des années. Afin d'assurer que la fenêtre donne la performance voulue, on peut faire l'essai en laboratoire d'une maquette grandeur nature pour évaluer son fonctionnement ou effectuer un essai sur le terrain pour vérifier qu'elle est bien construite selon les spécifications.

Quels sont les matériaux composant les fenêtres?

L'invention des fenêtres remonte presque au tout début de la civilisation. Plusieurs siècles avant Jésus-Christ, les maisons des Assyriens avaient des fenêtres longues et étroites séparées par des petites colonnes. Les Égyptiens représentaient déjà des fenêtres dans leurs premières fresques, et le temple légendaire de Karnak construit par les Pharaons Seti I et Ramsès II comportait lui-aussi des fenêtres. Dans à peu près tous les cas, elles ne consistaient qu'en des ouvertures pratiquées dans les murs, recouvertes à l'occasion par des peaux, des rideaux ou des pièces de nattes. Ce n'est qu'à l'apogée de l'architecture romaine que les fenêtres ont réellement commencé à ressembler aux fenêtres telles qu'on les connaît aujourd'hui. Habituellement, les Romains utilisaient des feuilles de mica, des panneaux de coquillages et même de minces feuilles de marbre diaphane comme vitrage.[3] Déjà au dixième siècle, la production du verre pour fenêtre était assez élevée dans le Nord de l'Europe, probablement en raison des rigueurs du climat.

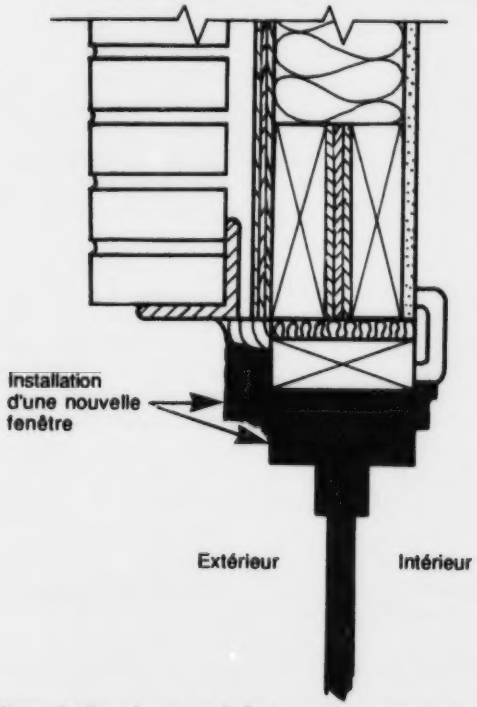


Figure 9. Remplacement de fenêtre typique : aucun écran pare-pluie ni étanchéité à l'air.

Les éléments de base de la fenêtre moderne sont les vitres, le vitrage, le châssis, le dormant, les produits d'étanchéité et coupe-froid et la quincaillerie (Figure 10).[4] Les vitres sont les portions transparentes de la fenêtre, fabriquées en verre ou en plastique. Le vitrage est l'assemblage des vitres et leurs attaches. Le châssis, partie manœuvrable de la fenêtre, contient le vitrage. Le dormant renferme le châssis et est maintenu dans le mur ou le toit au moyen d'attaches mécaniques. Les coupe-froid et les produits d'étanchéité assurent une protection contre la pénétration de la pluie et de la neige, l'écoulement d'air et de vapeur, la transmission du son à la jonction des matériaux, tandis que la quincaillerie assure le bon fonctionnement et le verrouillage du châssis.

Verre

Le verre est un matériau fragile fabriqué par fusion de la silice. La plupart des vitres sont faites en verre dit sodo-calcique car la soude et la chaux en sont les composés prédominants combinés avec la silice. Au Canada, le verre employé dans les vitrages est produit selon le procédé de flottage. Depuis les années soixante, le verre *flotté* a remplacé le verre *en feuille*, qui était plus ondulé et causait des distorsions visuelles. Dans le procédé de flottage, le verre fondu flotte dans un bain de métal fondu où il s'étend sur une épaisseur uniforme. Lorsque la feuille est tirée du bain, les deux faces sont planes et parallèles. Après qu'on lui ait donné la forme d'une bande continue, le verre est refroidi graduellement, dans un four de recuisson constante, jusqu'à ce qu'il atteigne la température de la pièce. Cette façon de procéder supprime la plupart des contraintes pouvant être présentes et laisse le verre pratiquement exempt de contrainte résiduelle. Le verre *recuit* peut être ensuite taillé. Le verre plane est en majorité vendu à l'état recuit.[2]

Plastiques

Certaines matières plastiques sont des matériaux avantageux à utiliser en raison de leur légèreté, leur maniabilité, leur transmission lumineuse et leur meilleure résistance au bris que le verre ordinaire; elles peuvent épouser plusieurs formes, donnant ainsi plus de latitude dans la conception. Les plastiques sont principalement utilisés dans des endroits qui nécessitent une certaine résistance aux produits chimiques ou dont les fenêtres sont sujettes à un taux élevé de bris et où l'utilisation du verre s'avère très coûteuse. Le plastique n'est pourtant pas incassable; à la suite d'un solide coup, le matériau plastique peut se briser en gros morceaux aux bords non coupants, mais il ne vole pas en éclats tranchants, comme c'est le cas du verre. Les plastiques les plus couramment utilisés sont les acryliques, le polycarbonate (PC), le poly(chlorure de vinyle) (PCV) et le polyester renforcé de fibres de verre (PRV).

Le coefficient de transmission lumineuse initiale de quelques plastiques est comparé à celui du verre au Tableau 1.[5] La baisse de qualité de la surface, causée par les égratignures au cours de la durée en service ou le vieillissement naturel, influent sur les propriétés optiques des plastiques. Le vieillissement naturel entraîne souvent une détérioration des propriétés optiques à cause de la décoloration, de la formation de

Tableau 1 Transmission lumineuse initiale des plastiques et du verre

Matériau de vitrage	Transmission lumineuse dans le visible (%)
PMM (acrylique)	91–93
Polycarbonate	82–89
PRV	76–85
PCV	76–89
Verre sodo-calcique	88–90

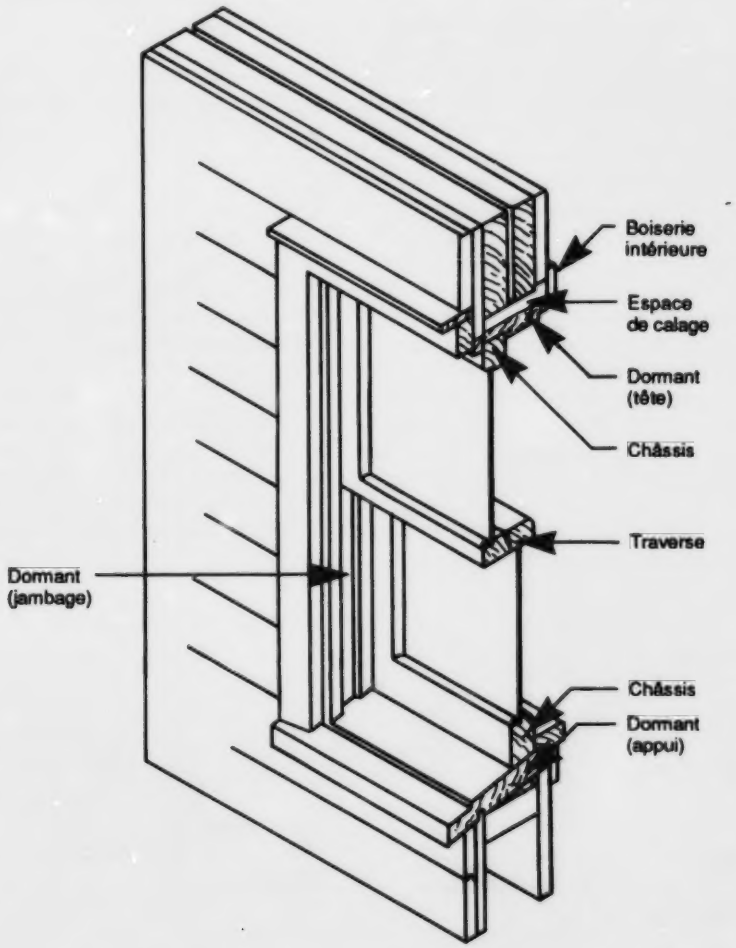


Figure 10. Composantes d'une fenêtre.

piqûres en surface, de la microfissuration, de l'érosion superficielle, du lessivage des constituants et de la dégradation chimique ou photo-chimique. Étant donné que ces plastiques se dilatent de quatre à dix fois plus que le verre[5] sous l'effet de la chaleur, ils peuvent causer une distorsion visuelle; c'est pourquoi il convient de les utiliser lorsqu'une visilibité parfaite n'est pas requise. Il faut apporter grand soin aux détails de la jonction vitrage–châssis afin qu'elle s'adapte aux mouvements thermiques.

Minces films

L'industrie du vitrage utilise des films de polyester et de mylar pour modifier les propriétés du verre ou pour le remplacer. L'application d'un film autocollant directement sur la surface intérieure de la vitre intérieure constitue une méthode particulièrement employée dans l'amélioration des bâtiments existants afin de réduire l'éblouissement et limiter les gains de chaleur solaire et l'entrée des rayons ultraviolets, ces derniers entraînant la décoloration des tissus. Les films servent également à créer des lames d'air multiples à l'intérieur des vitrages scellés; il existe sur le marché un système qui consiste en un vitrage double scellé comportant un film de polyester entre les deux vitres; il y a ainsi deux lames d'air sans le poids d'une troisième vitre. Ces minces films comportent habituellement un enduit visant à modifier les propriétés optiques du vitrage, soit pour réfléchir la chaleur solaire vers l'extérieur ou la chaleur interne vers l'intérieur, soit pour réduire la transmission lumineuse ou des rayons ultraviolets.

Vitrage

L'assemblage d'un vitrage multiple peut se faire de deux façons : il est scellé à l'usine ou il n'est pas scellé. Il y a environ trente ans apparaissait sur le marché la première génération de vitrage multiple scellé à l'usine. Cette technique qui, à l'origine, ne permettait aucun mouvement différentiel des vitres puisque ces dernières étaient assemblées au moyen d'attaches mécaniques, s'est améliorée avec l'utilisation de produits de calfeutrage qui allouent un certain mouvement des vitres et procurent un scellement «non rigide» des vitres. Il est possible que la technologie de pointe introduise de nouvelles façons de sceller les feuilles de verre.

Vitrage multiple scellé

Un vitrage multiple scellé en usine, également connu comme «vitrage isolant», est fabriqué avec deux feuilles de verre ou plus, séparées aux rives par un intercalaire contenant du dessicatif et scellées au périmètre par une étanchéité simple ou double (Figure 11). L'intercalaire consiste généralement en un profilé creux et rectangulaire d'aluminium ou d'acier inoxydable, comportant une fente pour que l'air de la cavité et le dessicatif soient en contact. La largeur de cet intercalaire dépend de la largeur de cavité voulue, soit habituellement entre 12 et 20 mm. Grâce aux récents progrès dans le domaine des intercalaires, on utilise d'autres matériaux comme la fibre de verre. Le dessicatif, composé d'un tamis moléculaire ou de gel de silice, absorbe l'humidité de l'air enfermé dans la cavité lors de la fabrication de même que toute humidité pouvant s'infiltrer par diffusion au cours de la durée en service du vitrage. Les fabricants doivent choisir des dessicatifs qui n'adsorbent pas l'azote car son adsorption entraîne la chute de la pression d'air dans la cavité, ce qui fait incurver le verre. La résistance thermique de la lame d'air se trouverait affaiblie au centre du vitrage de même que ce dernier pourrait perdre prématurément son étanchéité.

Le polysulphide, le butyle, la silicone et le polyuréthane sont couramment utilisés comme produits de calfeutrage; ils assurent le lien structural ainsi que l'étanchéité à l'air, à l'eau et à la vapeur. Un système breveté, sur le marché depuis plusieurs années déjà, incorpore l'intercalaire, le dessicatif et le produit

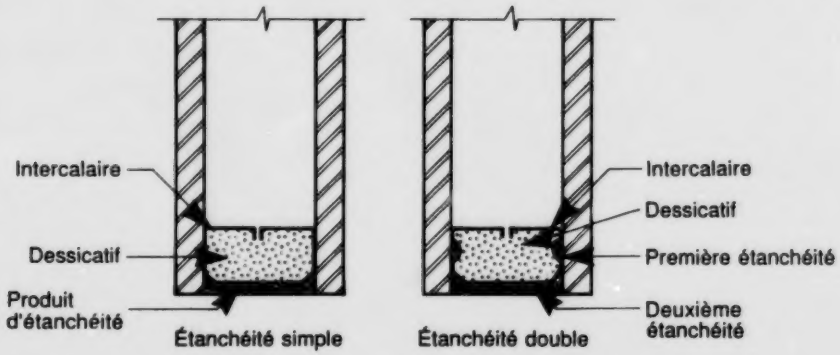


Figure 11. Vitrage double scellé en usine.

d'étanchéité en un seul produit : il consiste en un ruban de butyle renfermant une bande métallique séparatrice qui procure la rigidité nécessaire.

On compte parmi les principaux avantages du vitrage multiple scellé en usine l'absence de condensation entre les vitres, la réduction des surfaces à nettoyer (deux plutôt que quatre) et la capacité d'ajouter des options «haute technologie» comme les enduits, les films et les cavités remplies de gaz afin de répondre à des exigences particulières. Par contre, l'intercalaire métallique entre les vitres constitue un pont thermique qui refroidit le périmètre de la vitre intérieure et les risques de condensation sont plus élevés qu'avec un vitrage non scellé. Comme il s'agit d'un «système fermé», l'exposition du vitrage aux variations de température et aux pressions du vent entraîne l'incurvation du verre et, par conséquent, une compression et une tension des produits de calfeutrage. Dans certains cas, le vitrage scellé peut même subir une défaillance précoce. De telles défaillances prématurées peuvent tirer leur source à la fois dans le vitrage même et dans son installation. Il faudrait s'assurer que le produit choisi respecte la norme canadienne CAN2–12.8–M76 et, de préférence, le Programme de certification de l'Association canadienne de manufacturiers de vitrage isolant.

Vitrage double non scellé

Le vitrage double non scellé est disponible en deux modèles : les vitres sont posées soit dans le même châssis soit dans des châssis distincts (Figures 12 et 13).

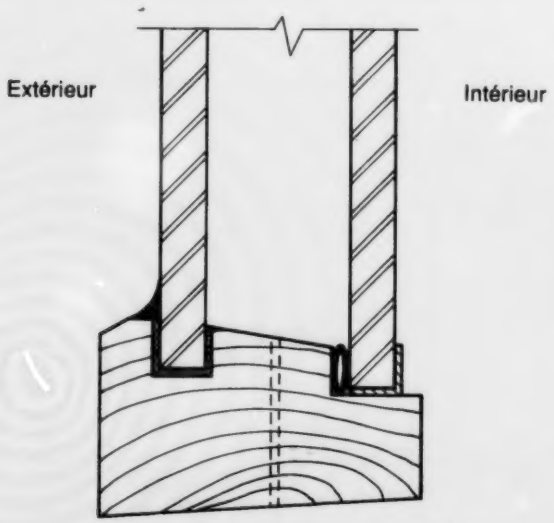


Figure 12. Vitrage double non scellé dans un châssis unique.

Dans le premier cas, l'espace entre les vitres est d'environ 20 mm et dans le deuxième, de 75 à 100 mm. Afin que ce type de vitrage soit efficace, le châssis intérieur doit être doté d'une bonne étanchéité à l'air qui réduira l'écoulement de l'air intérieur dans la cavité, sans quoi des fuites d'air excessives seront source de condensation dans la cavité. Il est possible d'améliorer encore sa performance en pratiquant une ouverture dans la cavité, vers l'extérieur, pour établir un équilibre entre la pression de la cavité et la pression extérieure. Alors, si l'air pénètre dans la cavité ou en sort en raison de la température ou de la pression du vent, la plupart des échanges d'air se feront avec l'air extérieur qui, en hiver, est plus sec et moins sujet à la condensation.

Ce vitrage est avantageux puisqu'on n'a pas à le remplacer en raison de la condensation; il requiert un entretien plus fréquent, comme le nettoyage des surfaces de la cavité, et peut ainsi durer longtemps. Par contre, il existe peu de moyens pour améliorer ce système sur le plan thermique, car un certain nombre de produits utilisés pour l'isolation thermique sont sensibles à l'humidité et aux polluants et doivent être placés dans les vitrages scellés. La disponibilité et le choix du vitrage double non scellé sont également restreints; quelques fabricants seulement produisent des vitrages doubles avec châssis unique et, bien que de nombreux fabricants produisent des vitrages doubles avec châssis distincts, ils sont généralement coulissants.

Châssis et dormant

À l'heure actuelle, les châssis et les dormants sont fabriqués en bois, en aluminium, en plastique, quelquefois en acier et, depuis peu, en fibre de verre. Chaque matériau a ses avantages et ses inconvénients, qu'il faut évaluer en fonction des critères de performance répondant aux besoins des propriétaires ou des usagers.

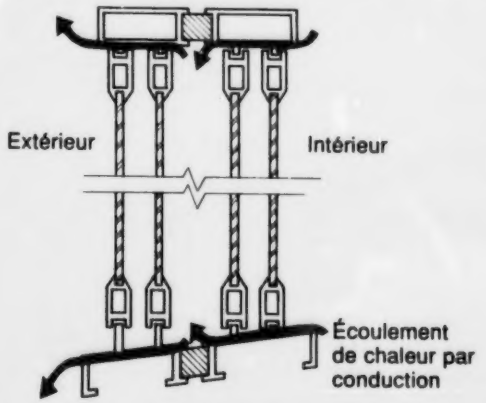


Figure 13. Trajet indirect du transfert de chaleur dans le dormant d'aluminium d'une fenêtre non scellée.

On combine souvent les matériaux pour obtenir un système amélioré.

Bois

Les fenêtres en bois sont depuis longtemps une particularité des maisons canadiennes; elles sont devenues traditionnelles, notamment dans les habitations. Elles sont surtout restreintes aux maisons et petits bâtiments traités dans la partie 9 du Code national du bâtiment, à cause de leur combustibilité et de leur entretien fréquent. La résistance thermique du bois est plus faible que celle des matériaux isolants; pourtant, lorsqu'il est utilisé dans une fenêtre, il procure au châssis et au dormant du côté intérieur une température supérieure à celle d'un vitrage double. Le bois que l'on utilise pour les fenêtres est massif; il n'y a alors aucune poche d'air par où la chaleur peut se perdre par convection et le matériau lui-même a une faible conductivité thermique. Les châssis et dormants sont fabriqués au Canada avec diverses espèces de bois; la plupart sont toutefois en bois tendre comme le pin, le cèdre et le sequoia. Bien qu'il soit traité avec un préservatif après avoir été coupé en longueur, le bois peut subir les effets de l'humidité et gauchir ou se tordre, et même pourrir si aucune mesure de prévention n'est prise. La distorsion des fenêtres de bois causée par l'absorption de l'humidité peut en entraver la manœuvrabilité. Il faut leur consacrer plus de temps et d'effort pour les protéger contre l'absorption d'humidité et les rayons ultraviolets. Elles doivent être peintes ou teintes peu de temps après leur installation et être entrenues tous les deux ou trois ans ou au besoin. La condensation en surface doit être surveillée de près puisqu'elle favorise la croissance des champignons et peut causer l'enflure du bois si celui-ci absorbe l'eau. Afin de réduire l'entretien des fenêtres de bois, certains fabricants offrent des revêtements extérieurs en aluminium ou en plastique. Le revêtement d'aluminium ne devrait pas entrer en contact avec le verre car cela refroidit sensiblement les rives et augmente le risque de bris d'origine thermique et de condensation en surface à l'intérieur. Comme ces matériaux de revêtement bloquent le passage de l'humidité, les trois autres surfaces du bois doivent comporter un pare-vapeur (peinture ou vernis) afin d'être protégées contre une accumulation excessive d'humidité à la surface extérieure du bois. Faciles à réparer, les châssis et dormants de bois ont démontré qu'ils résistaient à l'épreuve du temps.

Aluminium

Les fenêtres d'aluminium comportent des profilés extrudés creux fixés au moyen d'attaches mécaniques. Les profilés existent sous diverses formes; un profilé simple est illustré à la Figure 14. Étant donné que l'aluminium est un puissant conducteur de chaleur, un bris thermique (habituellement de plastique) est incorporé dans le châssis et le dormant pour réduire la conductivité directe entre les parties intérieure et extérieure de la fenêtre. Ainsi, la température de la surface intérieure du dormant est plus élevée et, dans une certaine mesure, les risques de condensation en surface sont amoindris. Dans certains cas, en vue de réduire les petites pertes de chaleur causées par la circulation de l'air dans les cavités des profilés du châssis et du dormant, on remplit ces cavités de mousse

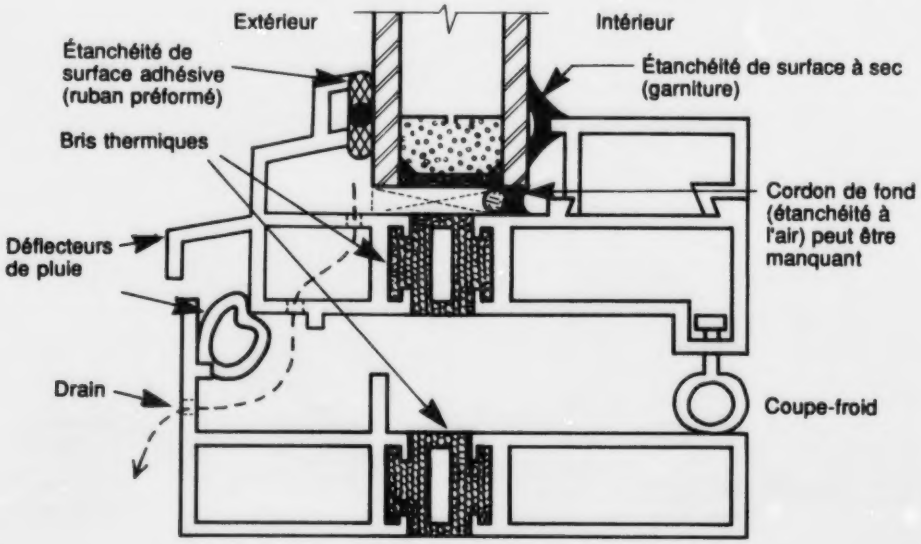


Figure 14. Coupe d'un dormant d'aluminium d'une fenêtre-auvent.

pulvérisée ou d'isolant rigide. Les fenêtres d'aluminium peuvent être conçues pour répondre aux besoins structuraux particuliers du bâtiment; elles conviennent parfaitement aux immeubles commerciaux et de grande hauteur où les charges du vent peuvent être fortes; elles sont également utilisées dans les murs–rideaux de verre et de métal. Elles peuvent être fabriquées de toutes les couleurs, certaines étant plus dispendieuses que d'autres et elles requièrent peu d'entretien; l'air salin et l'air pollué nuisent toutefois à sa durabilité.

La présence d'un bris thermique dans le dormant et le châssis n'est pas nécessairement suffisant pour contrôler la formation de condensation du côté intérieur. Par exemple, certains modèles de fenêtres utilisés dans des bâtiments commerciaux et des habitations ne contrôlent pas la conductivité thermique «indirecte» (Figure 13); le châssis coulissant d'un vitrage double non scellé permet encore à la chaleur de s'écouler en traversant un dormant muni d'un bris thermique. Comme le dormant d'une fenêtre peut se diviser en parties chaude et froide, la performance thermique de l'ensemble dépend largement du détail de la fenêtre. Il faut se pencher sur les questions suivantes pour évaluer la conception de la fenêtre : Le bris thermique du dormant s'aligne-t-il avec celui du châssis? La surface d'aluminium exposée du côté chaud du bris thermique est-elle plus grande que celle du côté froid? La jonction vitrage–châssis est-elle étanchéisée du côté extérieur ou intérieur du châssis? Le plan d'étanchéité à l'air est-il continu sur toute la fenêtre?

Poly(chlorure de vinyle) (PCV)

Le poly(chlorure de vinyle) est le matériau plastique que l'on utilise dans les fenêtres; il est thermoplastique,

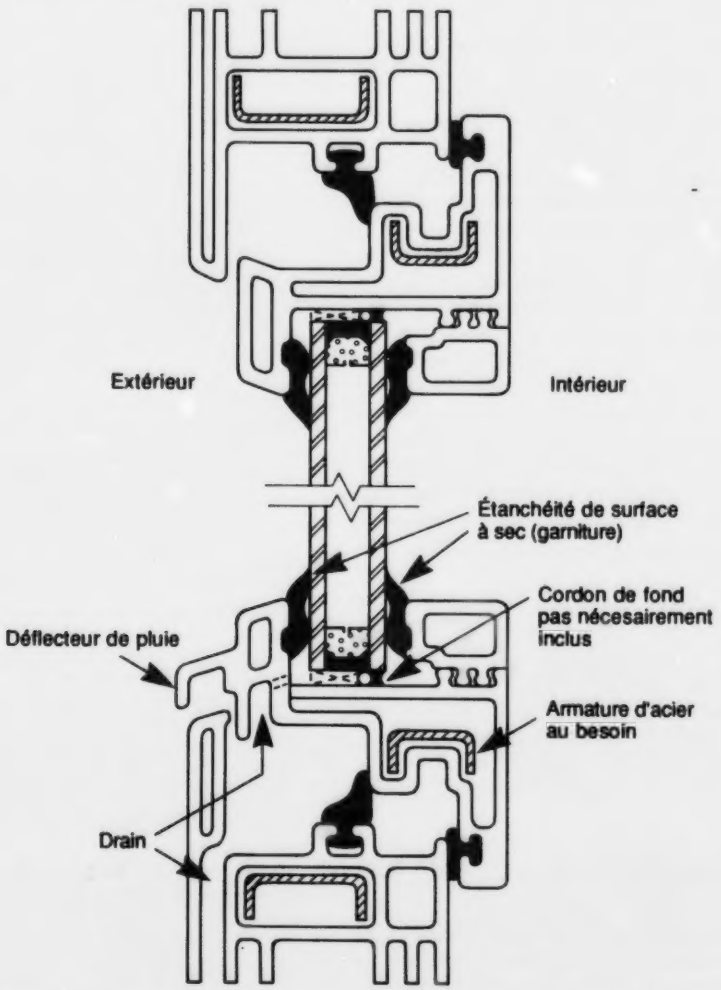


Figure 15. Coupe verticale d'une fenêtre de PCV (à battant ouvrant vers l'intérieur).

c'est-à-dire qu'il est susceptible de ramollir sous l'action de la chaleur et de durcir sous l'effet du froid. Le dormant et le châssis de PCV comportent un profilé creux contenant plusieurs petits espaces d'air (Figure 15). Les joints entre les éléments de PCV sont soudés à la chaleur ou à l'aide d'un solvent. Il est difficile de définir les caractéristiques du PCV utilisés à l'heure actuelle dans les fenêtres puisque les adjuvants jouent un rôle important au niveau des propriétés du produit fini; en outre, on a fait de grands progrès dans la formulation chimique du matériau. Les adjuvants peuvent être soit des plastifiants pour réduire la fragilité du matériau ou faciliter sa mise en forme, soit des stabilisants pour empêcher la dégradation causée par la chaleur, l'oxydation et les rayons solaires. On considère que la résistance thermique du PCV se situe habituellement entre celle du bois et celle de l'aluminium. Pour qu'un grand châssis de fenêtre soit bien rigide, on insère une armature d'acier dans le profilé du châssis; cette composante d'acier a tendance à refroidir le PCV environnant et à accroître sa conductivité thermique globale. L'entretien des fenêtres de PCV se borne pratiquement à un lavage périodique. Le PCV reste stable en présence d'air salin ou pollué. Par contre, le coefficient élevé d'expansion thermique (de deux à trois fois supérieur à celui de l'aluminium)[6] doit être pris en compte lors de la conception de la fenêtre et de son installation. Par exemple, dans un climat froid, le dormant de la fenêtre se contracte et la largeur de la jonction dormant–mur s'élargit; il faut donc choisir avec soin des produits d'étanchéité flexibles et déterminer avec attention la largeur du joint afin d'empêcher la rupture de cohésion du produit d'étanchéité. En raison de leur perte possible d'éclat, les couleurs de PCV ont été depuis longtemps restreintes aux tons pâles, mais des nouveaux développements ont pu améliorer cette caractéristique. Le PCV de couleur foncée exposé au sud peut être excessivement déformé à cause du haut degré d'expansion du plastique. En cas de dommages, les réparations devront être effectuées par une personne possédant des compétences spéciales.

Fibre de verre

Les fenêtres en fibre de verre n'ont été lancées sur le marché que dernièrement. Elles comportent des profilés creux pultrudés joints ensemble par des attaches mécaniques. Ces fenêtres sont si récentes que leur performance en service reste encore à déterminer.

Combinaison de matériaux

Les châssis et dormants de fenêtres peuvent être composés de divers matériaux combinés : il peut s'agir d'une fenêtre ayant un châssis de vinyle et un dormant d'aluminium, ou ayant un dormant de bois recouvert de vinyle combiné avec un châssis d'aluminium. L'évaluation de la performance s'avère difficile puisqu'on ne peut prédire avec précision l'interaction des propriétés de ces différents matériaux. Toutefois, si les avantages de chacun d'entre eux sont exploités, il peut en résulter une bonne performance.

Conclusion

De toute évidence, les fenêtres sont des composantes importantes du bâtiment. Même si, intuitivement, nous sommes tous d'accord avec cet énoncé, on ne cherche pas toujours à en tirer le meilleur parti possible. Quel type, quelle dimension, quelle forme, quelle orientation, combien, de quelle façon, comment être certain, comment l'assembler, quelle conception adopter, quels détails, que faut-il éviter, qu'est-ce qui est mieux, qu'est-ce qui est innovateur, qu'est-ce qui est prouvé : voilà toutes des questions auxquelles devrait répondre l'industrie de la construction pour chaque projet. Sont-elles en fait prises en considération? Trop de décisions ne sont toujours pas étayées des connaissances techniques de pointe sur les fenêtres et de leurs implications. Bien des problèmes pourront être évités grâce à la combinaison suivante : compréhension des principes de la conception, conception de détails réalisables, spécifications pertinentes au climat, construction soignée, essais appropriés au moment opportun et suivi aux praticiens sur la performance réelle du produit fini. Une communication efficace entre les diverses équipes de construction est également primordiale pour que celles-ci comprennent bien ce que le concepteur désire réaliser et pourquoi. Les exposés suivants visent à contribuer à l'avancement de la science du bâtiment et à son transfert aux praticiens. Grâce à ces derniers seulement pourrons-nous bénéficier de toutes les connaissances acquises!

Références

1. Association canadienne de normalisation, *Fenêtres*, Rexdale, Ontario, CAN3–A440–M84, 19 p.
2. McLellan, G.W. et E.B. Shand, *Glass Engineering Handbook*, McGraw–Hill, New York, 1984.
3. Schmidt, F.M., *The Window Book*, Season-All Industries Inc., Pennsylvanie, 1976.
4. Énergie, Mines et Ressources Canada, *L'amélioration thermique des fenêtres*, Enerdoc, CEMR–173, 1984.
5. Blaga, A., *Utilisation de plastiques dans le domaine du vitrage et de l'éclairage*, Conseil national de recherches du Canada, Institut de recherche en construction, Digest de la construction au Canada n° 213F, 1980.
6. Beckett, H.E. et J.A. Godfrey, *Windows*, Crosby Lockwood Staples en collaboration avec RIBA Publications Ltd., Londres, 1974.

FACTEURS DE PERFORMANCE DES FENÊTRES

W. C. Brown et K. Ruberg

Introduction

L'enveloppe du bâtiment isole le milieu ambiant intérieur du milieu extérieur. Elle protège les occupants des intempéries, du bruit et des intrus tout en limitant les pertes et les apports de chaleur. Contrairement aux éléments de bâtiment opaques, les fenêtres laissent passer la lumière. Malheureusement, elles offrent une faible résistance à l'écoulement de chaleur et à la transmission du son. Les fenêtres de verre résistent bien à la corrosion et au vieillissement; elles sont toutefois moins efficaces que la plupart des matériaux de construction des murs pour limiter la propagation du feu ou absorber les chocs. Enfin, elles posent des problèmes aux architectes qui doivent concevoir les joints destinés à les rendre solidaires du mur.

Les facteurs de performance des fenêtres comprennent ceux liés à la propriété qu'elles possèdent de transmettre la lumière et ceux applicables aux murs opaques. Ces facteurs peuvent être divisés en trois catégories :

- les fenêtres comme filtres d'énergie de l'espace
  - transmission de la lumière et vision extérieure
  - performance thermique
  - transmission du son
- les fenêtres comme éléments de l'enveloppe du bâtiment
  - résistance structurale
  - comportement au feu
  - étanchéité à l'air et pénétration de l'eau
- les fenêtres comme éléments du bâtiment
  - fonctionnement et méthodes de ventilation naturelle
  - sécurité
  - durabilité à long terme

Les niveaux de performance peuvent être déterminés par des normes ou, en l'absence de normes, sont implicitement établis par le concepteur du bâtiment ou par le rédacteur de devis.

Des normes comme celles élaborées par l'ACNOR[1] et l'ONGC[2] servent à l'établissement de critères minimaux de performance en termes de condensation, de rigidité du dormant et de durabilité des vitrages scellés. Certains manuels, dont ceux préparés par l'American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers[3] et par l'Illuminating Engineering Society[4] renseignent sur les charges de chauffage et de refroidissement engendrées par les fenêtres et sur les techniques d'éclairage naturel. Le Code national du bâtiment[5] et les codes provinciaux qui en découlent, fournissent des exigences minimales quant aux dimensions et à la disposition des fenêtres en terme de sécurité incendie. Finalement, les fabricants de vitrages et de fenêtres sont des sources d'information privilégiées pour quiconque veut se renseigner sur les propriétés structurales et les caractéristiques de transmission de leurs produits.

Le choix des fenêtres d'un bâtiment est fonction des exigences de l'occupant ou du propriétaire, du plan de façade et de la forme du bâtiment conçus par l'architecte et des contraintes environnementales que doit supporter l'enveloppe du bâtiment. Un grand nombre de facteurs, y compris ceux faisant l'objet d'une réglementation dans les codes du bâtiment, doivent être pris en compte lors du choix des fenêtres.

La fenêtre comme filtre d'énergie

Les fenêtres, en tant qu'éléments transparents de l'enveloppe du bâtiment, sont des «filtres d'énergie». En modifiant les caractéristiques du vitrage, ou de la

partie transparente de la fenêtre, différents «types» d'énergie peuvent être transmis ou réfléchis.

L'énergie rayonnante est caractérisée par sa longueur d'onde. Le monde visible par exemple est la réflexion d'un rayonnement dont la longueur d'onde est comprise entre 400 nm et 760 nm (1 nm = 10^{-9} m). Cette longueur d'onde correspond sensiblement à celle de l'irradiation maximale du soleil. La longueur d'onde des ultraviolets est plus courte alors que celle de la chaleur cédée par le corps humain (environ 10 000 nm) est plus longue. Ce «spectre» d'énergie, c'est-à-dire les longueurs d'onde maximales émises par le soleil et par les individus, est illustré à la Figure 1.[6]

Le verre clair transmet la plus grande partie du rayonnement solaire ou énergie de courte longueur d'onde. C'est en fait cette propriété qui permet de voir à travers le verre et d'utiliser la lumière du soleil pour éclairer les tâches à accomplir. L'énergie du rayonnement solaire peut également fournir un apport de chaleur dans une pièce.

Par contre, le verre clair absorbe la plus grande partie du rayonnement infrarouge (de longue longueur d'onde) émis par les individus et par les parois intérieures des bâtiments. La plupart des vitrages cependant, constituent de piètres isolants thermiques et l'énergie qu'ils absorbent est aisément rejetée vers l'extérieur en hiver. Le facteur de transmission des fenêtres est donc élevé lorsqu'on le compare à celui des murs isolés.

Le bruit est également un phénomène de fréquences. Les fenêtres peuvent transmettre le bruit par vibration mécanique et par les fuites d'air.

En déterminant correctement les longueurs d'onde que les vitrages doivent réfléchir, transmettre et absorber, les fenêtres peuvent diminuer les coûts de chauffage et d'éclairage et accroître le confort visuel des occupants du bâtiment. Un choix judicieux peut également optimaliser les performances thermique et acoustique des fenêtres.

Lumière et vision

D'un point de vue historique, la fonction première d'une fenêtre est de permettre l'entrée de la lumière et la vision sur l'extérieur. Tous les autres critères de performance doivent être subordonnés à ces deux objectifs.

Propriétés de transmission des vitrages

L'oeil est sensible aux radiations électromagnétiques dont la longueur d'onde est comprise entre 400 nm et 760 nm. Ce champ électromagnétique constitue la «lumière». Le verre clair transmet la plus grande partie du rayonnement visible qui frappe sa surface, puis absorbe ou réfléchit le reste (Figure 2). Les vitrages fortement teintés et réfléchissants transmettent aussi peu que 8 pour 100 du

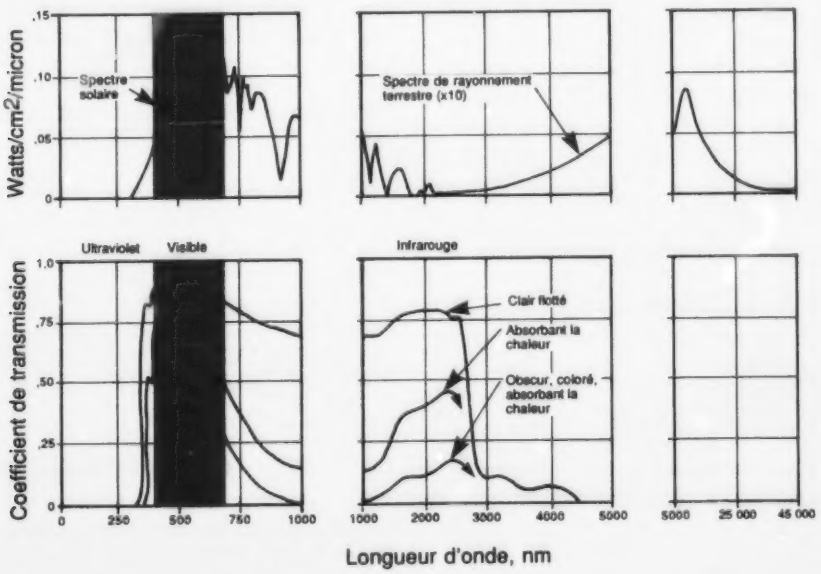


Figure 1. Rayonnement solaire et facteur de transmission spectrale pour le verre architectural type.

rayonnement. Le choix du vitrage peut avoir un effet déterminant sur la quantité de lumière naturelle qui entre dans une pièce et sa couleur. Les impuretés contenues dans le verre et l'épaisseur du vitrage augmentent le facteur d'absorption énergétique de ce vitrage. Le tableau 1 donne les valeurs de transmission lumineuse de divers types de vitrage.

Environ 3 pour 100 de l'énergie solaire qui frappe la surface de la terre se trouvent dans le domaine ultraviolet (UV) du spectre.[7] Le verre clair transmet environ 80 pour 100 du rayonnement ultraviolet incident, alors que les vitrages de plastique transmettent entre 20 et 40 pour 100 de ce rayonnement. Les vitrages qui transmettent une grande partie du spectre ultraviolet, comme par exemple ceux en verre de silice pure, sont particulièrement utiles dans les établissements de santé où l'on veut tirer profit des effets antibactériens et bénéfiques du rayonnement ultraviolet.[8] Par contre, la plupart des revêtements intérieurs de plastique, des peintures et des tissus se décoloreront sous l'effet des ultraviolets. Même un rayonnement solaire diffus contiendra suffisamment d'UV pour entraîner à la longue une décoloration des tissus et des œuvres d'art.

Tableau 1 Caractéristiques de transmission de la lumière

Description	Rayonnement visible
Flotté, verre clair à résistance simple	91 %
verre clair à résistance double	90 %
Flotté, clair – 2,35 mm d'épaisseur	91 %
6,35 mm d'épaisseur	89 %
19,05 mm d'épaisseur	83 %
Flotté, miroir clair	89 %
teinté bleu-vert	75 %
teinté bronze	28 %
Vitrage double, clair	80 %
teinté ou miroir (selon le teint)	10–35 %

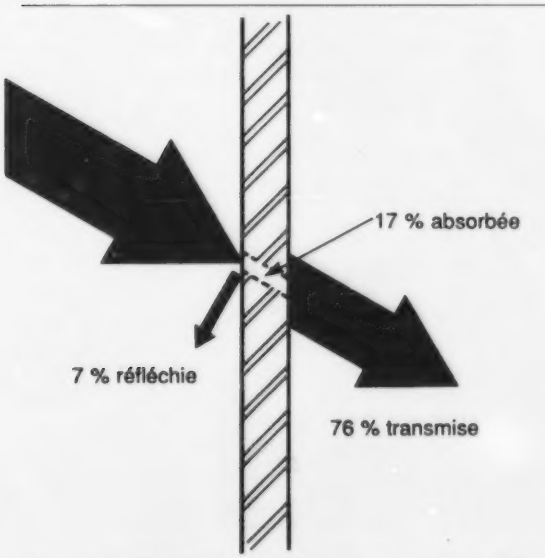


Figure 2. La lumière du soleil frappant une fenêtre peut être transmise, réfléchie ou absorbée.

Environ la moitié de l'énergie solaire se trouve dans le domaine infrarouge proche (onde courte) du spectre solaire. Le verre clair transmet entre 80 et 90 pour 100 de ce rayonnement, qui doit donc être absorbé ou réfléchi de façon sélective si l'on veut réduire l'apport de chaleur solaire. Le verre clair absorbe 80 à 90 pour [illegible] du rayonnement infrarouge lointain (onde longue) émis par les températures terrestres, mais [illegible] dans des proportions.

La lumière du jour

L'éclairage naturel est décrit comme étant l'utilisation de la lumière du jour pour éclairer les tâches à accomplir. Il contribue à réduire la consommation d'énergie utilisée pour l'éclairage et le refroidissement des grands immeubles commerciaux si le plan de conception de la fenestration et de l'espace est approprié et si la régulation [illegible] fait partie intégrante de l'éclairage naturel.

Alors que la luminosité améliore généralement la vision de la tâche, un éblouissement trop grand peut réduire l'acuité visuelle et la sensibilité différentielle. L'éblouissement est causé par la présence dans le champ visuel de sources excessivement lumineuses, comme le sont par exemple les fenêtres. L'éblouissement causé par la présence des fenêtres peut être supprimé en réduisant l'ouverture sur le ciel par le biais de végétation ou d'éléments en saillie, ou encore en diffusant davantage la lumière dans le bâtiment. En outre, l'utilisation de plus en plus répandue des écrans récepteurs a augmenté la fréquence de l'éblouissement perturbateur causé par le contraste d'une source lumineuse de forte intensité et la faible luminance du milieu environnant. Les écrans plats recouverts d'une couche antireflet permettent d'éliminer à peu près complètement ce problème (Figure 3).

Les vitrages teintés modifient le rendu des couleurs des meubles, des tissus et des tâches. Ainsi par exemple, un film de plastique jaune destiné à réduire l'apport solaire projette une lumière blafarde sur les occupants et les tâches. Mais si l'on remplace le jaune par une teinte dorée, on constate alors la disparition de cette partie jaunâtre du spectre sur les couleurs à l'intérieur du bâtiment.

L'immeuble Lockheed à San Francisco constitue un bon exemple d'intégration des caractéristiques de

l'éclairage naturel. Les lanterneaux, la conception des plafonds intérieurs et l'emplacement des fenêtres procurent un éclairage naturel relativement exempt d'éblouissement. À la Figure 4, une vue en coupe du bâtiment illustre les fenêtres hautes et les protections solaires qui régissent l'entrée de la lumière.[9] Des gradateurs de lumière réduisent de 60 pour 100 la consommation d'énergie de pointe, avec une simple période de récupération de 2.6 années.

Vision extérieure

Bien que ses avantages ne puissent être facilement mesurés ou compris, la vision extérieure est une caractéristique convoitée qui donnera de la valeur à une propriété, tant sur le marché des bâtiments d'habitation que sur celui des immeubles commerciaux. En Norvège, la vision extérieure et l'éclairage naturel sont

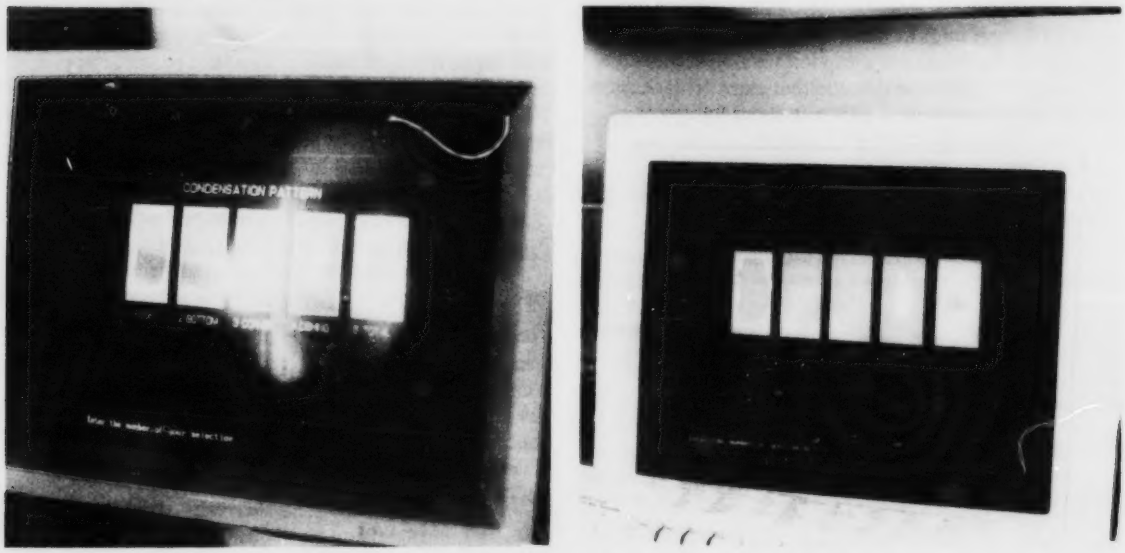


Figure 3. Les écrans plats recouverts d'une couche antireflet éliminent l'éblouissement.

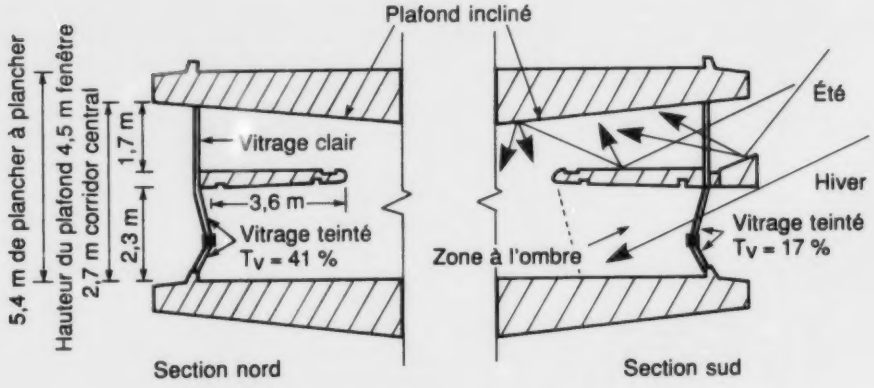


Figure 4. Les tablettes réfléchissantes et les plafonds inclinés de couleur claire distribuent la lumière naturelle aux surfaces de travail.

réglementés par le code du travail. À l'étape de la conception des bâtiments, le critère de vision a souvent priorité sur les facteurs thermiques liés à la dimension et à l'emplacement des fenêtres. Les enduits réfléchissants et les vitrages teintés peuvent modifier la perception visuelle de l'extérieur et la qualité architecturale du vitrage. Par exemple, un vitrage extrêmement réfléchissant ou de teinte sombre donnera toujours l'impression que le temps est nuageux même par une journée ensoleillée.

La lumière naturelle et la vision extérieure peuvent améliorer la qualité de l'habitat. Par contre, une mauvaise utilisation des fenêtres peut engendrer pour les occupants un inconfort qui exigera la mise en œuvre de mesures correctives.

Esthétique

La conception architecturale des façades s'est radicalement modifiée au cours du XX^{e} siècle avec l'apparition de ce produit de la technologie verrière que sont les grands panneaux de verre. Ces panneaux ont été d'abord utilisés pour les bâtiments de prestige, puis plus tard pour les bâtiments commerciaux. L'esthétique Bauhaus adoptée par les architectes nords-américains dans les années 50 est à l'origine des murs–rideaux en verre que l'on retrouve aujourd'hui sur la plupart des immeubles commerciaux.

Alors que dans le domaine de la conception architecturale des façades s'affrontent les tendances du déconstructivisme, du postmodernisme, du rationalisme, du brutalisme et de la forme libre, il faut inventer de nouveaux feuils de verre, de nouvelles formes et de nouveaux assemblages afin que les concepts véhiculés par ces tendances deviennent réalité. Les vitrages assumant des fonctions porteuses, les verres à miroir et les vitrages courbés ont permis aux architectes d'exercer leur art dans une grande liberté esthétique.

Les verres à miroir ont également donné aux centres-villes ces allures de couloir où le décor se réfléchit à l'infini. On trouve à la Figure 5 une vue du centre-ville d'Ottawa. Tom Wolfe a critiqué avec virulence l'utilisation excessive de ces «simples» façades collées sur des bâtiments en forme de boîte et les attribue à l'influence de l'esthétique Bauhaus en Amérique du Nord.[10]

Performance thermique

La performance thermique est le critère de rendement des fenêtres le plus couramment utilisé après celui de la lumière et de la vision extérieure. Elle tient compte à la fois des caractéristiques de transmission thermique par la fenêtre et des températures de surface du vitrage. La transmission thermique comprend les pertes de chaleur de l'intérieur vers l'extérieur et l'apport thermique du rayonnement solaire. La formation de condensation et son effet sur la durabilité des fenêtres sont liés aux températures de surface. De ces deux aspects de la performance thermique dépend le confort thermique à l'intérieur du bâtiment.

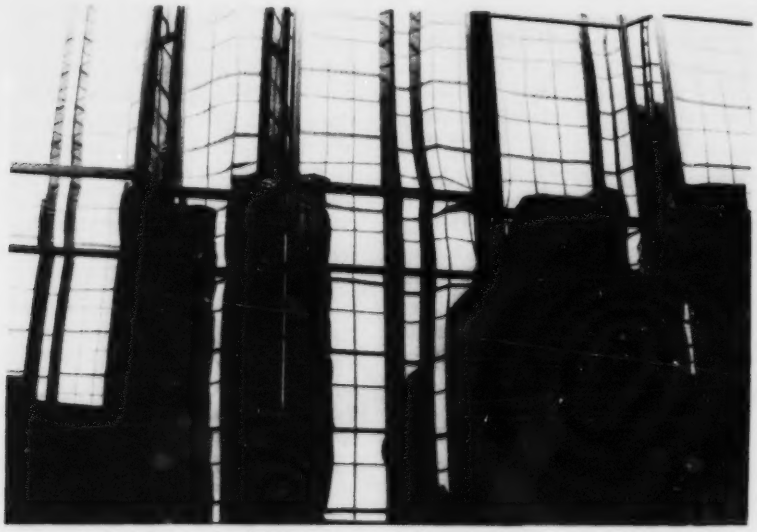


Figure 5. Centre-ville d'Ottawa

Transmission thermique

La chaleur est transmise d'un point chaud vers un point plus froid par conduction, par convection et par rayonnement. Ces trois mécanismes du transfert de chaleur sont déterminants dans la performance des fenêtres. La Figure 6 illustre les mécanismes du transfert de chaleur par les fenêtres.

Le coefficient de transmission thermique ou coefficient K sert normalement à mesurer les caractéristiques de transmission thermique des fenêtres. La quantité de chaleur transmise par une fenêtre est directement proportionnelle au coefficient K de celle-ci. Le coefficient K ne tient pas compte du transfert de chaleur sous l'action des fuites d'air et du rayonnement solaire. La résistance thermique globale, réciproque du coefficient K, est la somme arithmétique de la résistance thermique de la fenêtre, comprenant le vitrage et le dormant, et de la résistance thermique des surfaces intérieure et extérieure.

La plupart des produits en verre, d'épaisseur couramment utilisée pour les fenêtres, offrent une très faible résistance thermique (<0,02 m^2 K/W). Toutefois, la résistance thermique d'un vitrage peut être augmentée de façon significative en ajoutant une ou plusieurs lames d'air entre les vitres. Par exemple, la résistance thermique d'une lame d'air de 13 mm d'épaisseur entre deux vitres de verre clair est d'environ 0,21 m^2 K/W. Le transfert de chaleur dans cet espace se fera par conduction, par convection et par rayonnement. Les échanges thermiques par convection seront de peu d'importance dans les lames d'air dont l'épaisseur est inférieure à 15 mm, mais seront par contre plus significatifs à mesure que cette épaisseur et les écarts de température à l'intérieur de cet espace augmenteront. L'épaisseur maximale de la lame d'air des vitrages multiples de verre clair doit être de 12 à 25 mm.[11] On peut réduire le transfert de chaleur par conduction et par convection en ajoutant dans l'espace entre les vitres, un gaz de faible conductivité et de viscosité élevée; le transfert de chaleur par rayonnement peut être réduit si un enduit à faible émissivité est appliqué sur l'une des surfaces de la vitre ou sur les deux. Les avantages de ces deux méthodes sont examinés dans la cinquième communication intitulée *Technologie de pointe dans l'industrie de la fenêtre*.

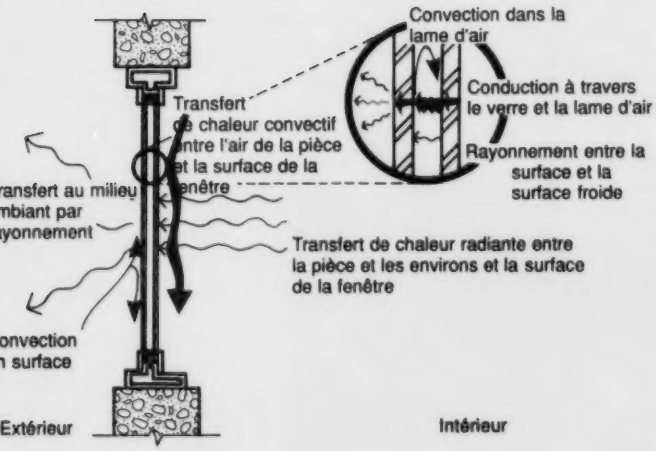


Figure 6. Mécanismes des pertes de chaleur par les fenêtres.

La transmission thermique par le dormant des fenêtres se fait par conduction. Le pourcentage du transfert global de chaleur qui s'effectue par le dormant d'une fenêtre est fonction des surfaces relatives du dormant et du vitrage et des matériaux qui composent le dormant. Les dormants en bois constituent de bons isolants thermiques. Afin de fournir un niveau de performance satisfaisant, les dormants d'aluminium et autres matériaux de faible résistance doivent comporter un matériau de résistance élevée entre la face intérieure et la face extérieure du dormant (procédé connu sous le nom de coupure thermique).

La chaleur transmise par une fenêtre se dissipe vers l'intérieur ou l'extérieur par convection et rayonnement. La résistance au transfert de chaleur selon ces deux mécanismes parallèles est appelée la résistance superficielle. Sa valeur dépendra de la vitesse de l'air traversant la fenêtre et de l'émissivité du vitrage. Si l'air est immobile, la résistance superficielle peut varier de 0,10 m^2 K/W à 0,38 m^2 K/W selon l'émissivité du vitrage et la différence de température entre le vitrage et ce qui l'entoure.[12] À des fins de calcul, une valeur de 0,12 m^2 K/W est généralement acceptable en hiver pour un vitrage clair vertical. Cette valeur correspond environ au tiers de la résistance globale attribuée à une fenêtre à double vitrage.

L'apport solaire peut compenser pour une partie ou pour la totalité des déperditions de chaleur par une fenêtre.[13] Un vitrage double orienté vers le sud sous des latitudes inférieures à 50° N peut avoir un apport thermique net au cours de la saison de chauffe. Sous des latitudes plus septentrionales, l'apport solaire ne suffira pas à compenser les déperditions de chaleur par les vitrages clairs. L'utilisation de vitrages à faible émissivité augmentera l'apport solaire. Les apports solaires passifs sont plus efficaces dans les habitations où la régulation de la température n'est pas un facteur

important et où la plus grande partie des coûts est associée au chauffage des locaux en hiver.

Si l'on examine les nombreux bâtiments existants qui utilisent les techniques solaires passives, on découvre que la méthode ayant donné les meilleurs résultats est celle des «apports directs». Selon cette méthode, la plupart des fenêtres du bâtiment sont orientées vers le sud. Cependant, il est maintenant démontré que la surface de vitrage orientée vers le sud ne doit pas dépasser 15 pour 100 de la surface de plancher afin de limiter la surchauffe.

Température de surface

La condensation sur les fenêtres est un problème courant dont se plaignent les occupants. Elle survient lorsque les températures de surface à l'intérieur sont inférieures au point de rosée de l'air ambiant. Les températures de surface intérieure des fenêtres ont tendance à être peu élevées puisque la résistance thermique des vitrages est généralement plus faible que la résistance superficielle intérieure.

La performance relative aux températures de surface des vitrages peut être améliorée de plusieurs façons. Des lames d'air multiples, des enduits à faible émissivité et des gaz de faible conductivité dans l'espace entre les vitres augmenteront la résistance thermique. La résistance superficielle intérieure peut être réduite en installant la vitre intérieure sur le nu intérieur du mur ou encore en soufflant de l'air directement à la surface de la vitre. Des enduits spécialement conçus pour absorber le rayonnement solaire permettront également de hausser les températures de surface intérieure les jours d'ensoleillement. Les deux dernières méthodes devraient toutefois être utilisées avec discernement, compte tenu des possibilités de rupture thermique qu'elles comportent.

La performance relative aux températures de surface du dormant peut être améliorée en utilisant dans sa construction des matériaux de faible émissivité ou en concevant des coupures thermiques entre les surfaces intérieure et extérieure du dormant. Un châssis ou un dormant dont la surface exposée sur l'intérieur est plus grande que celle exposée vers l'extérieur améliorera également cette performance.[14] Dans des cas extrêmes, un apport supplémentaire de chaleur produite par exemple à l'aide d'un filament chauffant, et répartie de façon sélective sur le dormant amènera une diminution des risques de condensation. Cette dernière technique constitue une mesure corrective à des problèmes engendrés entre autres, par une modification de l'usage d'un bâtiment ou des conditions d'exploitation.

Confort thermique

Les conditions de confort thermique sont modifiées par la présence des grandes parois froides que sont les fenêtres en hiver. Celles-ci peuvent en effet être à l'origine de l'inconfort des occupants soit à cause de la chaleur rayonnante émise par les occupants vers la paroi froide, soit à cause des courants d'air froid émanant de la paroi. La pose de rideaux ou de tentures réduira les effets des parois rayonnantes froides. Dans la plupart des cas cependant, l'installation de chauffage du bâtiment devrait être en mesure de supprimer ces facteurs d'inconfort.

La chaleur due au rayonnement solaire direct peut également incommoder les occupants d'un local. La température dans une pièce dotée de grandes parois vitrées orientées vers le sud peut être agréable au mois de janvier et février mais insupportable le reste de l'année, particulièrement au printemps et à l'automne. De façon semblable, les vitrages horizontaux orientés vers l'ouest amènent une surchauffe en été et par conséquent une augmentation significative de la charge calorifique. En fait, l'une ou l'autre de ces situations amènera une utilisation accrue de l'installation de conditionnement d'air et réduira le confort thermique des occupants.

Transmission du son

La transmission du son par les fenêtres est régie par les mêmes principes physiques que la transmission du son par les murs, à savoir la masse et la rigidité de la fenêtre. Cependant, les mesures de limitation du bruit dépendent à la fois des propriétés du vitrage et des caractéristiques du châssis des fenêtres.[15,16] Étant donné que le son est un phénomène aérien, l'étanchéité à l'air des fenêtres devra être un facteur déterminant dans les mesures destinées à limiter le bruit.

Le son est composé de nombreuses fréquences. La perte de transmission du son est une mesure normalisée de la réduction du bruit pour des gammes de fréquences données. L'indice de transmission du son (ITS), la mesure la plus couramment utilisée en Amérique du Nord, est obtenu en comparant la courbe des pertes de transmission mesurée à des courbes de référence. Bien que l'ITS des éléments de bâtiment permette en général d'évaluer leur capacité à réduire la transmission des bruits comme ceux produits par la voix, il ne permet pas d'évaluer correctement l'isolation aux bruits riches en basses fréquences comme ceux des circulations aérienne et routière.[17]

On exige généralement un ITS variant entre 30 et 45 pour l'isolation aux bruits extérieurs des fenêtres.

Des méthodes de calcul permettant d'obtenir les valeurs corrigées de l'ITS sont présentées dans les codes provinciaux et des directives publiées par la Société canadienne d'hypothèques et de logement.[18] Une autre méthode de calcul est également présentée dans une publication de l'IRC.[19]

Un double vitrage de type courant (c.-à-d. verre de 4 mm et lame d'air de 13 mm) monté dans un dormant de bois possède un ITS d'environ 33. L'ITS augmente en fonction de l'épaisseur du verre et de celle de la lame d'air entre les vitres (voir Tableau 2).[20] Ainsi, en doublant la lame d'air, on triple la valeur de l'ITS. Cependant, si l'épaisseur de la lame d'air est inférieure à 10 mm, l'ITS sera presque équivalent à celui obtenu avec un vitrage simple fabriqué du même verre. Les valeurs de l'ITS d'un double et d'un triple vitrage ayant une épaisseur totale similaire ne différeront pas de façon significative à moins que l'épaisseur de la lame d'air du triple vitrage soit supérieure à 25 mm. En utilisant du verre d'épaisseur variée, on obtient un ITS plus élevé. Par exemple, un double vitrage ayant une vitre de 3 mm et une autre de 6 mm aura un ITS équivalent ou plus élevé à celui d'un double vitrage ayant deux vitres de 6 mm. Un rapport du simple au double de l'épaisseur est généralement le plus efficace.

La transmission de l'énergie sonore par le dormant des fenêtres peut poser des limites à la réduction du bruit. Des essais sur des vitres montées dans des châssis de bois supportés par un dormant de 40 mm d'épaisseur du même matériau ont démontré que la transmission par le dormant était minime. Certains essais effectués avec des dormants métalliques légers ont donné des ITS inférieurs, en raison sans doute de la transmission des vibrations par le dormant de la fenêtre. Lorsqu'on veut obtenir des valeurs d'ITS élevées, il faut utiliser des vitrages séparés, supportés par des murs indépendants pour éliminer le problème de la transmission du son par le dormant.

La transmission du son par les interstices des fenêtres diminue la valeur de l'ITS. Ainsi par exemple, l'ITS d'une fenêtre ouvrante, même bien calfeutrée, est généralement de 3 à 5 fois inférieur à celui d'une fenêtre fixe.

Tableau 2 Réduction de la transmission du son

Épaisseur du verre (mm) N° 1	N° 2	Lame d'air (mm)	ITS
3	s/o	s/o	29
6	6	12	29
12	6	50	39
12	6	102	40
12	6	152	42
19	10	152	40
12	6	152	44
5	8	102	39
25	6	152	40

La fenêtre comme élément de l'enveloppe du bâtiment

Le vitrage est devenu un élément prédominant dans la construction des murs de la plupart des immeubles commerciaux, représentant parfois 90 pour 100 de la surface totale. Les fenêtres doivent être en mesure de supporter les contraintes structurales auxquelles est soumise l'enveloppe du bâtiment. De plus, le comportement au feu des fenêtres doit être pris en compte lors de la conception d'un bâtiment. Les exigences relatives au comportement au feu des fenêtres sont contenues dans les codes provinciaux du bâtiment. Finalement, les fenêtres doivent également remplir les rôles de barrière d'étanchéité à l'air, à la vapeur et à l'eau.

Comportement structural

Le comportement structural du verre exige que la résistance du matériau soit suffisante pour supporter les contraintes qui lui sont imposées. Ces contraintes sont causées par des facteurs environnementaux comme le vent, la température et la pression barométrique et des facteurs physiques comme les caractéristiques du vitrage et la déformation des éléments qui le supportent.

Résistance du verre

Le verre sodo-calcique est généralement utilisé pour les fenêtres. Le verre flotté recuit est le plus répandu et le plus économique. Le verre à résistance accrue par traitement thermique est deux fois plus résistant que le verre recuit mais deux fois moins que le verre trempé, souvent utilisé lorsqu'un verre de sécurité est exigé. Alors que la plupart des verres se brisent en gros morceaux, la fragmentation du verre trempé se fait en petits morceaux ne présentant pas de danger de coupure grave.[21] Très rarement, le verre trempé éclate spontanément sous l'effet d'inclusions microscopiques.

Le verre est un matériau fragile dont la rupture peut être soudaine et dangereuse. La résistance théorique du verre, relativement élevée en traction et en compression, ne peut être obtenue en pratique à cause des défauts que l'on trouve à la surface et sur les bords des panneaux de verre. Les microfissures à la surface du verre sont de véritables facteurs de concentration des contraintes et réduisent considérablement la résistance à la traction.[22] L'effet de ces facteurs augmentant avec l'âge du verre, le verre ancien est généralement moins résistant que le verre neuf.

Étant donné que la résistance du verre varie selon les défauts de surface dont la gravité et la répartition sont aléatoires, les contraintes de rupture d'échantillons de verre d'un même lot varieront tout autant. La contrainte de rupture ne s'exprime pas par un simple chiffre mais plutôt par une valeur moyenne et une mesure de sa variabilité par rapport à cette moyenne. La dispersion relative est obtenue en divisant l'écart type par la moyenne, c'est-à-dire le coefficient de variation. Le coefficient de variation de la contrainte de rupture du verre recuit est d'environ 20 à 25 pour 100; il est généralement moindre pour le verre à résistance accrue par traitement thermique et le verre trempé. Puisque les probabilités de défauts augmentent avec la surface du verre, la contrainte de rupture moyenne tend à diminuer à mesure que la surface augmente.

Il est courant lors du calcul des vitrages, de fixer la probabilité de rupture à 0,8 pour 100 (8 sur 1000) en tenant compte de la charge de calcul déterminée pour leur installation. Étant donné que cette charge de calcul comporte également une probabilité statistique de rupture au cours de la durée de vie d'un bâtiment, le risque de rupture pendant la première année est généralement 10 fois moins élevé que le facteur de probabilité de rupture spécifié. Il faut néanmoins tenir compte de la durée de vie prévue des vitrages dans le calcul du verre. Plus la durée de vie prévue du revêtement extérieur est longue, moins élevée devra être la probabilité de rupture spécifiée.

Des caractéristiques techniques particulières doivent être envisagées lorsque le verre doit résister à des surcharges autres que celles dues au vent. Le verre laminé, par exemple, est généralement employé pour les cages de sécurité et les aquariums qui nécessitent une résistance aux chocs et une solidité accrues. Une vitre intérieure laminée ou comportant un treillis métallique sera par contre souvent utilisée pour les vitrages inclinés et les lanterneaux afin de prévenir la chute des fragments de verre en cas de bris.

Contraintes exercées sur le verre et le châssis

Les angles et les façades des bâtiments de grande hauteur, particulièrement ceux de forme irrégulière, sont soumis à des pressions du vent complexes. Les essais en soufflerie sont à l'heure actuelle la méthode la plus fiable pour déterminer les variations de pression de calcul sur la façade des bâtiments commerciaux. Le Supplément du Code national du bâtiment fournit toutefois des méthodes simplifiées permettant de calculer les pressions du vent sur le revêtement extérieur (en verre).[23]

Il incombe généralement à l'architecte de spécifier les surcharges dues au vent lors de la conception du revêtement extérieur de bâtiments commerciaux. Le calcul des structures exige en outre d'indiquer les rapports de surface et de forme des vitrages. Finalement, des coefficients de probabilité de rupture acceptables doivent être spécifiés lorsque l'entreprise participant à l'appel d'offre doit calculer la résistance du verre et que l'épaisseur optimale des vitrages doit être déterminée.

Les contraintes thermiques donnant lieu à des ruptures thermiques sont une autre source de préoccupation lors du calcul des surfaces vitrées. Ces contraintes sont causées par un écart de température entre les bords et le milieu de la vitre. La contrainte de rupture d'une vitre dépend essentiellement de l'état de la bordure de cette vitre. Afin de réduire les risques de coupure thermique, il faut éviter les situations suivantes :

- des connecteurs de faible résistance thermique reliés à des dissipateurs de chaleur comme la maçonnerie qui peuvent abaisser la température des bords du vitrage,
- des dormants profonds qui assombrissent les bords du vitrage et favorisent l'apport solaire par son milieu,
- une vitre réfléchissante orientée vers la lame d'air d'un vitrage double ou un carreau intérieur de verre absorbant,
- des installations de conditionnement d'air soufflant de l'air directement sur le vitrage.

Des joints mal conçus peuvent également entraîner une rupture du vitrage. Ainsi par exemple, les mouvements du bâtiment et la dilatation du verre sous l'effet de la chaleur peuvent amener le verre à entrer en contact avec le métal. Les problèmes causés par les joints des fenêtres peuvent être évités en suivant les recommandations des fabricants.

Les méthodes de calcul structural du verre varient selon les concepteurs. Une nouvelle norme, sur le point d'être publiée, devrait toutefois clarifier bon nombre des problèmes que pose le calcul structural du verre.[24]

Comportement au feu

La plupart des matériaux de vitrage, y compris le verre, ne résistent pas à la chaleur et aux pressions engendrées par un incendie. Les vitrages de plastique peuvent augmenter la charge combustible d'un local. Le feu peut également se propager par les fenêtres aux murs extérieurs, puis aux bâtiments voisins. Néanmoins, les fenêtres sont fréquemment utilisées pour satisfaire aux exigences du Code du bâtiment en matière de sorties d'urgence et d'accès au bâtiment pour les pompiers.

Degré de résistance au feu

L'utilisation des vitrages dans les séparations coupe-feu est sévèrement réglementée par les divers codes, y compris le Code national du bâtiment. Le panneau de verre ordinaire éclate après seulement quelques minutes d'exposition au feu à cause des contraintes thermiques produites par des écarts de température importants dans la vitre et entre les bords et le milieu de la vitre.[25] La pression positive, due à la dilatation des gaz de combustion dans le compartiment étanche au feu et à laquelle sera soumise la vitre, soufflera littéralement la vitre hors de son dormant.

La limitation des surfaces du verre et le renforcement du verre à l'aide d'un treillis métallique qui en retient les fragments en cas de bris sont les deux méthodes traditionnelles qui autorisent l'utilisation du vitrage dans les bâtiments résistants au feu. Le verre armé peut être utilisé dans les portes pour lesquelles un degré de résistance au feu de 2 heures est exigé (CNBC 3.1.6.11), à condition que la surface du verre n'excède pas 645 cm^2. Selon le Code national du bâtiment, cette surface peut être doublée dans le cas des murs extérieurs de faible distance limitative pourvu que les vitrages soient de verre armé ou en briques de verre (CNBC 9.10.14.4).

Exigences du Code relatives aux moyens d'évacuation

Dans le domaine de la construction d'habitations, le Code national du bâtiment exige que certaines dispositions soient prises pour permettre l'évacuation d'urgence des pièces où l'on dort. Une chambre sans porte donnant accès à l'extérieur doit avoir au moins une fenêtre ayant une ouverture dégagée d'au moins 380 mm en hauteur et en largeur et une surface d'au moins 0,35 m^2 (CNBC 9.7.1.3).

Pour combattre l'incendie dans les petits immeubles collectifs d'habitation, le Code national du bâtiment exige que des «panneaux ouvrables» soient prévus au sous-sol et au troisième étage sur au moins une façade donnant sur la rue. Ces panneaux doivent avoir une hauteur d'au moins 1,1 m et une largeur d'au moins 0,5 m, s'ouvrir facilement ou être vitrés avec du verre ordinaire (CNBC 9.10.19.1). Dans les grands bâtiments, ces panneaux doivent être séparés d'au plus 15 m sur la façade donnant sur la rue (CNBC 3.2.5.1).

Ces exigences contenues dans l'édition 1985 du Code national du bâtiment du Canada peuvent différer quelque peu de celles contenues dans les codes provinciaux. Elles sont toutefois représentatives des règles imposées par les codes du bâtiment.

Étanchéité à l'air et pénétration de l'eau

En tant qu'élément de l'enveloppe du bâtiment, les fenêtres doivent être en mesure de limiter l'humidité et les fuites d'air et d'assurer une protection convenable contre le vent et la pénétration de l'eau. De fait, la fenêtre joue le rôle de pare-vapeur, de pare-air et de protection contre les intempéries. Bien que les caractéristiques fondamentales de ces systèmes d'étanchéité soient présentées ici, la conception des joints et l'installation des fenêtres font l'objet du quatrième exposé intitulé *Intégration de la fenêtre à l'enveloppe du bâtiment*.

Diffusion de la vapeur d'eau et limitation des fuites d'air

L'humidité sous forme de vapeur d'eau est évacuée de l'intérieur où l'air ambiant est chaud et humide, vers l'extérieur où l'air est froid et sec, par diffusion de la vapeur d'eau et par les fuites d'air. Ces deux mécanismes de transfert de l'humidité sont bien distincts et requièrent des mesures spécifiques destinées à en limiter les effets. Même si les fuites d'air constituent le mécanisme principal de transfert de l'humidité, les deux phénomènes peuvent entraîner des problèmes de condensation qui auront un effet sur le facteur de durabilité. Les fuites d'air augmenteront également les déperditions thermiques et réduiront l'isolation acoustique.

La diffusion de la vapeur d'eau par les interstices et les matériaux perméables à la vapeur d'eau se produit sous l'effet des écarts de pression de la vapeur d'eau. Ces écarts de pression sont causés par une différence entre les taux d'humidité intérieure et extérieure. Bien que tous les matériaux de construction offrent une certaine résistance à la diffusion de vapeur d'eau, un «pare-vapeur» (c'est-à-dire un matériau dont la perméabilité à la vapeur est inférieure à la norme courante) est normalement installé pour limiter l'évacuation de l'humidité par diffusion.

Les fuites d'air par les interstices et les matériaux perméables à l'air se produisent sous l'effet des écarts de pression d'air. Ces différences de pression sont causées par l'effet de tirage, le vent et les installations mécaniques de ventilation. Les fuites d'air doivent être limitées par une série de mesures destinées à renforcer l'étanchéité à l'air. L'efficacité d'un système d'étanchéité exige des matériaux de faible perméabilité à l'air, des joints étanches et une capacité de résister aux contraintes engendrées par les différences de pression d'air.

Le verre et la plupart des matériaux de vitrage résistent efficacement au passage de la vapeur d'eau et

de l'air. On trouvera dans la norme CAN3–A440–M84 sur les fenêtres, les méthodes normalisées destinées à mesurer l'étanchéité à l'air des fenêtres. Les joints des fenêtres doivent être conçus et mis en œuvre de façon à ne pas compromettre l'efficacité des mesures destinées à limiter l'humidité dans les bâtiments.

Protection contre les intempéries

L'eau et la neige pénètrent dans l'enveloppe du bâtiment sous l'effet de la gravité et des différences de pression dues au vent. Même si les matériaux utilisés pour les vitrages sont imperméables à l'eau, on trouvera dans la norme de l'ACNOR A440 les méthodes destinées à mesurer l'étanchéité à l'eau des fenêtres.

Tout comme pour la limitation de la diffusion de vapeur d'eau et des fuites d'air, une attention spéciale doit être portée aux joints puisqu'ils constituent un endroit de prédilection pour la pénétration de l'eau. La fenêtre doit faire partie intégrante de la protection contre les intempéries de l'enveloppe du bâtiment si l'on veut obtenir des niveaux de performance satisfaisants. Il faut également prévoir, lors de la conception des fenêtres, des dispositifs permettant l'évacuation de l'eau qui réussirait tout de même à s'infiltrer.

La fenêtre comme élément du bâtiment

Une fois installée, la fenêtre doit répondre aux exigences du mode de fonctionnement prévu et être maintenue en bonne condition de service. Le choix du type de fenêtre est fonction du rôle que celle-ci est appelée à jouer dans le bâtiment. La presque totalité des immeubles commerciaux en Amérique du Nord sont dotés de fenêtres fixes et étanches et d'installations de chauffage, de ventilation et de conditionnement d'air. Par contre, la ventilation et le conditionnement d'air mécaniques étant un phénomène beaucoup moins fréquent dans les bâtiments d'habitation, la presque totalité de ces bâtiments possèdent des fenêtres ouvrantes.

Manœuvre des fenêtres

L'utilisation des fenêtres pour la ventilation et le refroidissement de l'air en été est généralisée au Canada. Tout comme pour l'éclairage naturel, la disposition et la forme des fenêtres déterminent les caractéristiques de la ventilation naturelle du bâtiment. Le type de fenêtre alors spécifié est fonction des exigences en matière d'esthétique, d'évacuation et de ventilation. Il existe de nombreux types de fenêtres ouvrantes qui vont de la fenêtre à battant à la fenêtre coulissante et la fenêtre à guillotine, en passant par la fenêtre–auvent et la fenêtre à soufflet.

Facilité de manœuvre

L'utilité d'une fenêtre comme dispositif de ventilation et moyen d'évacuation suppose qu'elle puisse être ouverte sans difficulté par la majorité des gens. La facilité de manœuvre est un facteur particulièrement important pour les personnes handicapées ou âgées.

Une étude effectuée par l'Université d'Ottawa a démontré qu'une personne physiquement handicapée et une personne ne souffrant d'aucune incapacité pouvaient exercer la même force sur le dispositif d'ouverture d'une fenêtre à battant. La même comparaison avec une fenêtre à guillotine révélait cependant que la personne handicapée ne pouvait exercer que 20 pour 100 de la force utilisée par la personne ne souffrant d'aucune incapacité. Bien qu'il ait été également démontré que les personnes handicapées ont besoin de plus de temps pour ouvrir une fenêtre, la différence ne s'est pas avérée suffisante pour engendrer des problèmes dans une situation d'urgence.[26]

Une autre étude effectuée par le Building Research Establishment au Royaume-Uni a révélé que la hauteur du dispositif d'ouverture au-dessus du niveau du plancher était également importante lorsqu'un effort maximum était exigé. Dans ce cas, la hauteur variait entre 1 m et 1,6 m selon le type de dispositif utilisé. Cette étude a également mis en relief le lien qui existe entre l'effort exigé et la dimension de même que la forme du dispositif d'ouverture.[27]

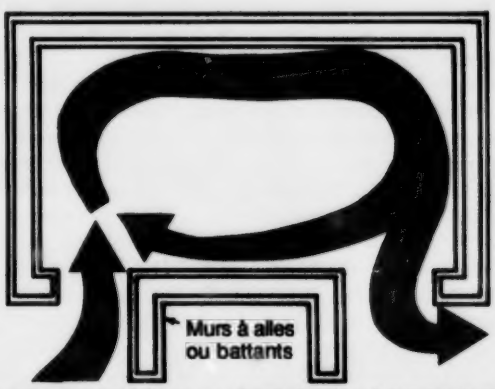


Figure 7. Choix de l'emplacement des fenêtres dans une pièce pour assurer une ventilation maximale.

Ventilation naturelle

Les fenêtres ouvrantes permettent le refroidissement de l'air ambiant et la ventilation naturelle. Ainsi, en laissant pénétrer l'air extérieur par les fenêtres, on peut évacuer la chaleur et les mauvaises odeurs. (Et parfois laisser entrer les mauvaises odeurs!) La quantité d'air qui pénètre dans les pièces est fonction du site et de la forme du bâtiment, de la configuration des aires communicantes, de la forme des fenêtres, de leur dimension et de leur répartition. L'aération naturelle, c'est-à-dire par des ouvertures sur deux murs opposés, dont l'un est exposé au vent et l'autre est abrité du vent, constitue la méthode de ventilation par les fenêtres la plus courante. Les murs à ailes (Figure 7) peuvent augmenter les possibilités de ventilation dans une pièce à deux fenêtres.[28]

Sécurité

Les fenêtres doivent être protégées des bris accidentels dans les aires de circulation commune, et de l'effraction. Dans le premier cas, les exigences du Code national du bâtiment rendant obligatoire l'utilisation de verre trempé minimisent les risques pour les occupants. Les vitrages doivent de plus être clairement visibles dans les endroits où l'on risquerait de s'y heurter. Le verre laminé doit être utilisé dans des circonstances où la rupture du verre pourrait présenter un risque de blessures pour les occupants, comme dans le cas des lanterneaux.

Le vitrage, le dormant et les ferrures sont des éléments déterminants pour prévenir l'entrée par effraction. Il est aujourd'hui prouvé que les voleurs hésitent toujours à casser une vitre pour pénétrer à l'intérieur d'un bâtiment.[29] Les ferrures d'une fenêtre (p. ex. les charnières, les dispositifs de verrouillage, etc.) doivent donc être installées à l'intérieur ou dans le dormant et être inaccessibles de l'extérieur à l'aide d'un simple outil. Les dispositifs de verrouillage des mécanismes coulissants doivent également être en mesure d'empêcher le déboîtement du châssis. D'autres types de dispositifs de sécurité peuvent être incorporés à la fenêtre. Par exemple, le treillis métallique laminé à l'intérieur du vitrage peut être relié à un système de sécurité. Des barreaux d'acier encastrés dans la maçonnerie protègeront contre l'effraction mais ne permettront pas l'utilisation des fenêtres comme sorties d'urgence.

Le verre laminé augmente le facteur de sécurité des fenêtres. L'épaisseur du verre à l'épreuve des balles varie entre 12 et 50 mm, selon le type de projectiles qu'il est destiné à arrêter. Le vitrage de sécurité nécessite des feuillures profondes afin de tenir en place le verre éclaté. Les plastiques comme les polycarbonates et les acryliques, possèdent une résistance aux chocs de 20 à 30 fois supérieure à celle du verre et leur utilisation devrait être envisagée lorsque la situation l'exige. Leur résistance aux éraflures et au vieillissement n'est toutefois pas aussi élevée que celle du verre et leur coût est supérieur.[30,31]

Durabilité

Comme pour tous les éléments de l'enveloppe du bâtiment, la durabilité à long terme des fenêtres dépend des contraintes extérieures auxquelles elles sont soumises et des matériaux constituants. Cependant, au contraire des éléments opaques du bâtiment, la détérioration de la surface du vitrage altèrera la performance tout autant que l'apparence. Un bon entretien du vitrage et du dormant contribuera à prolonger la durée de vie des fenêtres. À cet effet, les dispositions pour le nettoyage des fenêtres des bâtiments de grande hauteur doivent être prises à l'étape de la conception des façades. Il pourra en effet s'avérer coûteux d'inclure ces dispositions une fois la conception de la façade terminée, particulièrement si la forme du bâtiment est complexe et multi-dimensionnelle.

Liste de vérification des facteurs de performance

Les fenêtres sont des éléments complexes de l'enveloppe du bâtiment. Dans leur choix, les architectes et les concepteurs doivent tenir compte des besoins des occupants et de l'environnement du bâtiment. Une bonne performance dans un domaine peut signifier devoir accepter une performance moins exceptionnelle dans un autre. Cette nécessité de céder certains avantages en contrepartie d'autres doit être parfaitement comprise au moment de concevoir les fenêtres d'un bâtiment.

De nombreux aspects de la performance des fenêtres ne sont pas traités dans les normes. Cependant, l'évolution constante des méthodes normalisées d'évaluation de la performance des fenêtres ne rendent plus aussi essentiel le besoin d'établir des critères d'évaluation subjective. La norme de l'ACNOR A440 et la norme provisoire ONGC–12.20–M ont été conçues pour faciliter l'établissement des exigences de performance des fenêtres.

Enfin, les nombreuses possibilités du marché en termes de vitrages et de dormants exigent la recherche d'un équilibre entre la performance et les coûts. S'il est vrai qu'une fenêtre pourra remplir ses fonctions mieux qu'une autre, le défi consiste cependant à répondre aux exigences de performance à l'aide des différents

produits existants, tout en restant dans les limites du budget fixé. Les facteurs de performance examinés dans cet exposé constituent une liste de vérification pour le concepteur. Il ne lui restera finalement qu'à assurer une adéquation optimale des normes, des restrictions budgétaires et des niveaux de performance voulus.

Remerciements

Les auteurs désirent remercier J.D. Quirt, J. Haysom et W.A. Dalgliesh de l'Institut de recherche en construction pour l'aide qu'ils leur ont apportée dans la rédaction de cet exposé.

Références

1. Association canadienne de normalisation, *Fenêtres*, Rexdale, Ontario, CAN3–A440–M84, 1984.
2. Office des normes du gouvernement canadien, *Panneaux isolants en verre*, CAN2–12.8–M76, 15 p., 1976.
3. American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, *Handbook of Fundamentals*, Atlanta, Georgie, 1985.
4. Illuminating Engineering Society of North America, *Recommended Practices of Daylighting*, New York, RP–5–79, 50 p., 1979.
5. Comité associé du Code national du bâtiment, *Code national du bâtiment du Canada*, Conseil national de recherches du Canada, CNRC 23174F, 1985.
6. Garden, G.K., *Caractéristiques du verre à vitre*, Institut de recherche en construction, Conseil national de recherches du Canada, Digest de la construction au Canada n° 60F, 4 p., 1968.
7. Shand, E.B., *Glass Engineering Handbook*, McGraw Hill, New York, p. 65, 1958.
8. Hopkinson, R.G., P. Petherbridge, et J. Longmore, *Daylighting*, Heinemann, London, p. 8–9, 1966.
9. Benton, C., M. Warren, et S. Selkowitz, *Lighting System Performance in an Innovative Daylighted Structure: An Instrumented Study*, 2nd International Daylighting Conference, Long Beach, CA, 1986, Lawrence Berkeley Laboratories, Berkeley, Californie, sous presse.
10. Wolfe, Tom, *From Bauhaus to one house*, Washington Square Press, New York, 128 p., 1982.
11. Solvason, K.R. et A.G. Wilson, *Fenêtres à double vitrage scellées à l'usine*, Institut de recherche en construction, Conseil national de recherches du Canada, Digest de la construction au Canada n° 46F, 4 p., 1963.
12. American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, *Handbook of Fundamentals*, Atlanta, Georgie, 1985.
13. Barakat, S. A., *Solar heat gain through windows in Canada*, Institut de recherche en construction, Conseil national de recherches du Canada, CNRC 18674, 1980.
14. Wilson, A.G., *Condensation sur les surfaces intérieures des vitres*, Institut de recherche en construction, Conseil national de recherches du Canada, Digest de la construction au Canada n° 4F, 4 p., 1960.
15. Quirt, J.D., *Transmission du son par les fenêtres*, Institut de recherche en construction, Conseil national de recherches du Canada, Digest de la construction au Canada n° 240F, 4 p., 1985.
16. *Lutte contre le bruit dans les bâtiments*, Compte rendu du Regard 85 sur la science du bâtiment, Institut de recherche en construction, Conseil national de recherches du Canada, CNRC 27844F, 60 p., 1987.
17. American Society for Testing and Materials, *Standard classification for determination of sound transmission class*, Philadelphie, Pennsylvanie, Norme E 413–73, 3 p., 1987.
18. Société canadienne d'hypothèques et de logement, *Le bruit du trafic routier et ferroviaire : ses effets sur l'habitation*, NHA 5156 et NHA 5185, 1981.
19. Quirt, J.D., *Calcul de l'insonorisation des bâtiments*, Institut de recherche en construction, Conseil national de recherches du Canada, Note sur la construction n° 56F, 34 p., 1987.
20. *Window selection guide*, American Architectural Manufacturer Association.
21. Wassermuhl, S., *A guide to vision glazing*, The Canadian Architect, p. 48–50, novembre 1987.
22. Bowes, W.H., L.T. Russell, et G.T. Suter, *Mechanics of engineering materials*, John Wiley and Sons, New York, p. 579, 1984.
23. Comité associé du Code national du bâtiment, *Supplément du Code national du bâtiment du Canada*, Conseil national de recherches du Canada, CNRC 23178F, 1985.
24. Office des normes du gouvernement canadien, *Structural design of glass for buildings*, Ottawa, Ontario, norme provisoire 12.20–M, 1988.
25. Kim, A.K., *Fire exposure of glazing*, Compte rendu de la 4e Conférence sur la science et la technologie du bâtiment, Université de Waterloo, Waterloo, Ontario, 1988.
26. Yung, D. et I. Oleszkiewicz, *Fire spread via exterior walls of buildings*, Compte rendu de la 4e Conférence sur la science et la technologie du bâtiment, Université de Waterloo, Waterloo, Ontario, p. 2–12, 1988.
27. Dainty, D.A. et al., *A final report on the evaluation of window opening capacities*, Rapport préparé par l'Université d'Ottawa pour le Conseil national de recherches du Canada, contrat n° 080–082/0–4424, 1981.
28. Covington, S.A., *Ergonomics requirements for windows and doors*, Building Research Station, Garston, Royaume-Uni, Building Research Establishment Information Paper IP 2/82, 1982.
29. Shandra, S., K. Ruberg et A. Keresteciogiu, *Outdoor testing of small scale naturally ventilated models*, Building and Environment, Vol. 18, No. 1/2, p. 45–53, 1983.
30. Collin, I.D. et E.J. Collins, *Window selection: A guide for architects and designers*, Newnes-Butterworths, Londres, p. 88–89, 1977.
31. Dietz, A.G.H., *Plastics for architects and builders*, MIT Press, Cambridge, Massachussetts, p. 65.

Normes sur la performance globale des fenêtres

A.H. Elmahdy et A. Patenaude

Introduction

Comme on l'a vu dans les exposés précédents, les fenêtres, composantes relativement complexes de l'enveloppe du bâtiment, doivent être évaluées comme un système indépendant, comme un élément de l'enveloppe et comme un élément intégré à l'environnement intérieur. Le présent exposé traite des normes des fenêtres considérées dans le contexte d'un système indépendant. L'étude de l'intégration des fenêtres à l'enveloppe du bâtiment fait l'objet de l'exposé intitulé *Intégration de la fenêtre à l'enveloppe du bâtiment*. L'intégration des fenêtres au milieu intérieur fait l'objet de l'exposé *Facteurs de performance des fenêtres*.

Un système peut être défini comme un produit conçu pour accomplir une multitude de fonctions psychologiques et physiologiques. La raison d'être des fenêtres dans l'enveloppe du bâtiment est surtout d'offrir une vue sur l'extérieur. Les avantages d'ordre psychologique résultant de la présence de fenêtres dans un mur par rapport au même mur borgne sont nombreux. Comme le système de fenêtres fait partie de l'enveloppe du bâtiment, il doit remplir les mêmes fonctions physiques qu'un mur, en plus de satisfaire à d'autres exigences particulières.

L'évaluation de la performance d'une fenêtre particulière tenant compte de tous les critères physiques requiert de nombreuses heures de travail. L'avantage de disposer d'un certain nombre de critères communs pour évaluer un produit ou un système comme une fenêtre est évident et n'a pas besoin d'être davantage expliqué. La série de critères communs doit être constituée des critères essentiels à la performance du système, et toute méthode d'évaluation de la performance en laboratoire doit permettre de classer le produit de façon concordante avec sa performance une fois posé. Les progrès visant à satisfaire ces besoins ont conduit à l'élaboration de la nouvelle norme CAN3–A440–M84,[1] qui constitue l'objet du présent exposé.

Normes sur les fenêtres en vigueur au Canada

Actuellement, il existe plusieurs normes sur les fenêtres (voir le Tableau 1). Avant la publication de la norme CAN3–A440–M84, les normes canadiennes sur les fenêtres étaient élaborées en fonction du matériau constitutif des dormants (bois, PCV, aluminium) et du mode de fonctionnement. Toutes les normes prescrivaient des caractéristiques et contenaient des exigences de performance qui variaient beaucoup d'une norme à l'autre. De plus, pour certains matériaux constitutifs des dormants (fenêtres non ouvrables en acier et contre-fenêtres en bois et vinyle), les divers types de fenêtres n'étaient pas pris en considération et les normes ne s'appliquaient pas aux fenêtres constituées de plusieurs matériaux. Comme il était alors impossible de comparer les produits d'une norme à l'autre, la Société canadienne d'hypothèques et de logement (SCHL) et l'industrie de la construction ont exprimé le besoin d'élaborer une nouvelle norme s'appliquant à toutes les fenêtres.

La ligne directrice pour l'élaboration de la norme CAN3–A440–M84 était qu'*une fenêtre n'était rien d'autre qu'une fenêtre* et devait donc remplir les mêmes fonctions, que les dormants soient en bois, en aluminium, en PCV ou en une combinaison de ces matériaux. Théoriquement, une seule norme de performance aurait pu être préparée; mais cela n'aurait été ni pratique ni économique à cause des nombreux essais nécessaires pour traiter de tous les critères du produit. C'est la raison pour laquelle la norme contient certains éléments prescriptifs. Ces derniers sont des valeurs usuelles, par exemple, l'épaisseur du bois, du métal ou du PCV.

La norme A440 a été élaborée à partir d'un consensus, comme c'est le cas pour les autres normes de produits canadiens. Un comité technique a été mis sur pied qui représente de façon équitable les producteurs, les utilisateurs et les groupes intéressés. Après plusieurs ébauches et un travail acharné de tous les intervenants, une norme représentant le consensus de tous les groupes impliqués a été approuvée.

Norme CAN3–A440–M84

Échantillon

Un seul échantillon est utilisé pour toute la série d'essais. L'échantillon est un modèle neuf de fenêtre complète, préfabriquée, avec toutes les ferrures et les moustiquaires (le cas échéant), typique de la production normale.

Les dimensions de l'échantillon sont celles indiquées au Tableau 2, sauf lorsque le fabricant souhaite démontrer la conformité de fenêtres de dimensions plus petites ou plus grandes. Les dimensions hors tout du dormant principal indiquées au Tableau 2 ont été choisies selon le principe voulant que 90 pour 100 environ des fenêtres fabriquées au Canada soient plus petites que les valeurs indiquées.

Pour les fenêtres dont les dimensions vont jusqu'à 25 pour 100 de plus (pour chaque dimension) que celles indiquées au Tableau 2, des calculs peuvent être effectués pour prouver la conformité à l'essai de résistance aux surcharges de vent. Pour les autres essais, les résultats obtenus avec l'échantillon de dimensions standard peuvent être extrapolés pour les plus grandes dimensions afin de conclure à la conformité. Les fenêtres plus grandes de 25 pour 100 (dans chaque dimension) que celles du Tableau 2 doivent être soumises à des essais.

Séquence des essais

L'essai d'étanchéité à l'air, l'essai d'étanchéité à l'eau et l'essai de résistance aux surcharges dues au vent doivent être effectués dans cet ordre. Tous les autres essais peuvent être effectués, s'ils s'appliquent, soit avant, soit après ces trois essais selon l'appréciation du laboratoire d'essais.

Tableau 1 Normes sur les fenêtres en vigueur au Canada

Norme	Type de fenêtre	Matériau du châssis	Qualité
63–GP–1M[2]	à guillotine et coulissante	aluminium	robuste
63–GP–2M[3]	"	"	moyenne
63–GP–3M[4]	"	"	standard
63–GP–5M[5]	"	acier	"
63–GP–6M[6]	"	"	moyenne
63–GP–7M[7]	"	aluminium	robuste
63–GP–8M[8]	en saillie (à battant, en auvent, à soufflet)	"	moyenne
63–GP–9M[9]	à guillotine (demi-châssis)	"	standard
63–GP–11M[10]	contre-fenêtre (horiz. et vert.)	"	"
63–GP–12M[11]	fixe	"	"
63–GP–13M[12]	contre-fenêtre (horiz. et vert.)	"	"
A274–M1980[13]	à guillotine et coulissante	PCV	"
	à battant		moyenne
	en auvent		robuste
	à soufflet		
O132.1–M1977[14]	à guillotine et coulissante	bois	standard
	à battant		
	en auvent		
	à soufflet		
	sans châssis		
CAN3–A440–M84	tous	tous	toutes

Tableau 2 Dimensions des échantillons

Type de fenêtre	Dimensions extérieures du dormant (± 100 mm) largeur (mm)	hauteur (mm)
À guillotine	1000	1600
Coulissante	1600	1000
À battant	700	1600
En saillie	1000	1000
Fixe	2000	2000

Généralement, les essais sont effectués dans l'ordre suivant :

Essais communs

- facilité de manœuvre,
- étanchéité à l'air,
- étanchéité à l'eau,
- résistance aux surcharges dues au vent.

Essais particuliers

- résistance à la condensation,
- résistance à l'effraction,
- chute libre,
- blocage,
- résistance et rigidité du châssis,
- résistance des moustiquaires,
- arrachement du châssis.

Les sections qui suivent décrivent le but de chaque essai, l'appareillage et la méthode d'essai, ainsi que les exigences de performance avec des commentaires sur l'essai et sur les exigences. Dans certains cas, des comparaisons avec les normes étrangères équivalentes sont faites.

Facilité de manœuvre (fenêtres ouvrables seulement)

But

Cet essai permet de mesurer la force nécessaire pour initier et maintenir le mouvement d'un châssis mobile de la position complètement fermée à la position complètement ouverte.

Appareillage et méthode d'essai

On mesure, à l'aide d'un dynamomètre ou d'un appareil de mesure des couples, les forces (ou les couples) nécessaires pour initier et maintenir le mouvement du châssis.

Exigences de performance

La force mesurée ne doit pas être supérieure à la valeur correspondante du Tableau 3.

Commentaires

Les forces de manœuvre maximales sont basées sur des données ergonomiques qui acceptaient le fait que 90 pour 100 de la population puisse exercer la force nécessaire pour ouvrir et fermer les fenêtres. Dans certains cas spéciaux, des forces de manœuvre différentes de celles indiquées dans la norme peuvent être spécifiées.

Étanchéité à l'air

But

Cet essai sert à mesurer le taux d'infiltration d'air d'une fenêtre subissant une pression différentielle statique positive de 75 Pa. Cette pression différentielle correspond à l'effet d'un vent de 40 km/h agissant perpendiculairement aux surfaces extérieures de la fenêtre.

Appareillage et méthode d'essai

Comme on peut le voir à la Figure 1, l'appareillage d'essai comprend :

- une chambre d'essai avec une ouverture pour mettre en place l'échantillon,
- un dispositif de mesure du taux d'infiltration d'air,
- un dispositif de mesure de la pression différentielle.

L'essai doit être effectué conformément à la norme E 283–84[15] de l'ASTM avec une différence de pression de 75 Pa; le taux d'infiltration d'air est rapporté en $m^3/h/m$ de longueur de joint.

Exigences de performance

Les fenêtres sont classées en fonction du taux d'infiltration d'air (m^3/h) par unité de longueur de joint (m) (Tableau 4).

Tableau 3 Forces nécessaires pour la manœuvre

Type de fenêtre	Point d'application de la force	Direction de la force	Force maximale pour initier le mouvement (N)	Force maximale pour maintenir le mouvement (N)
À guillotine	centre de la poignée ou de la traverse de rencontre	verticale, parallèle au plan de la vitre	200	100
Coulissante	centre de la poignée ou de la traverse de rencontre	horizontale, parallèle au plan de la vitre	90	45
À battants et en saillie (avec manivelle)	extrémité de la manivelle	perpendiculaire à la poignée de la manivelle	60	30
Pivotante à battant et en saillie (avec levier de manœuvre)	extrémité du levier	perpendiculaire au levier dans le plan de son déplacement	200	100
Autres types à battant et en saillie	centre du châssis à l'opposé des charnières ou des poignées	perpendiculaire au plan de la vitre	200	100

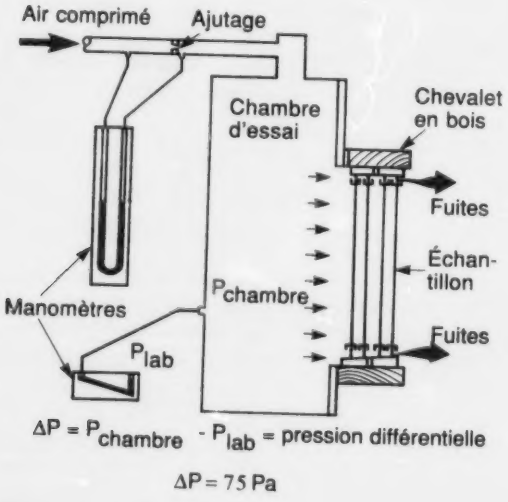


Figure 1. Essai d'infiltration d'air.

Tableau 4 Catégories, étanchéité à l'air

Catégorie de fenêtre	Fuite d'air maximale par unité de longueur de joint sous 75 Pa ($m^3/h/m$)
A1	2,79
A2	1,65
A3	0,55
Fixe	0,25
Contre-fenêtre	5,0–8,35

Commentaires

Le Tableau 4 présente trois catégories de fenêtres pour l'étanchéité à l'air. Le concepteur peut ainsi choisir des fenêtres plus performantes que la catégorie minimale A1. Une meilleure catégorie est nécessaire dans les localités canadiennes où le vent dépasse souvent les 40 km/h et pour les fenêtres des bâtiments de grande hauteur.

Lorsque les fenêtres sont exposées à des vents très forts, il peut être souhaitable que le concepteur évalue les caractéristiques d'étanchéité à l'air des fenêtres pour une gamme de pressions du vent. Par conséquent, la norme exigera peut-être la détermination des taux d'infiltration d'air des fenêtres pour des pressions différentielles allant de 0 à 300 Pa.

Le comité considère aussi d'inclure des exigences d'étanchéité à l'air pour l'exfiltration. Cette exigence peut être importante pour les fenêtres des bâtiments de grande hauteur où il se produit une exfiltration par les fenêtres situées au-dessus du plan de pression différentielle nulle. Dans ces cas de pression différentielle inversée, les fenêtres présentent des caractéristiques d'étanchéité à l'air assez différentes.

Étanchéité à l'eau

But

Le principe de cet essai consiste à arroser au jet la surface extérieure de la fenêtre en appliquant une pression différentielle cyclique à la fenêtre qui simule la pression variable du vent sur le bâtiment. Toute eau qui s'infiltre dans la chambre d'essai ou à travers le mur d'essai ou qui reste confinée à l'intérieur de l'ensemble de construction constitue une preuve de défaillance de la fenêtre.

Appareillage et méthode d'essai

L'appareillage d'essai de base comprend :

- une chambre d'essai avec une ouverture pour installer la fenêtre,
- un dispositif permettant de maintenir une différence de pression de part et d'autre de la fenêtre,
- un dispositif permettant de faire varier rapidement la pression différentielle d'air entre des limites bien définies,
- un dispositif permettant d'asperger l'échantillon d'eau, de façon uniforme et avec un débit donné,
- un dispositif permettant d'évacuer l'eau de la chambre d'essai,
- un dispositif de mesure de la différence de pression de part et d'autre de la fenêtre.

Les essais doivent être effectués conformément à la norme E 547–86[16] de l'ASTM (c'est-à-dire avec une pression différentielle donnée pour la fenêtre et un débit d'eau de 3,4 $L/min/m^2$). Pour chacune des pressions d'essai successives, quatre cycles doivent être exécutés, chaque cycle consistant en cinq minutes avec la pression et une minute sans la pression. L'aspersion d'eau doit être continue.

Exigences de performance

Les fenêtres sont classées selon la pression différentielle maximale qu'elles peuvent supporter sans fuite d'eau. Le Tableau 5 donne les catégories de fenêtres selon l'essai d'étanchéité à l'eau.

Tableau 5 Catégories, étanchéité à l'eau

Catégorie de fenêtre	Pression différentielle statique (Pa)
B1	137
B2	200
B3	250

Une fenêtre répond aux exigences de l'essai d'étanchéité à l'eau si :

- l'eau ne mouille pas les surfaces intérieures du local habité,
- l'eau ne s'infiltre pas, par la fenêtre, dans le mur sous l'appui de fenêtre,
- l'eau ne reste pas emprisonnée dans la fenêtre lorsqu'on annule la pression d'air à la fin de l'essai.

Commentaires

On trouve sur le marché canadien des produits importés qui ont été évalués d'après les normes d'autres pays. Afin d'effectuer un choix judicieux de modèle de fenêtre, il est avantageux de comparer la méthode d'essai du pays exportateur avec la méthode d'essai canadienne.

Les méthodes d'essais d'étanchéité à l'eau des pays européens se font avec une gamme de pressions différentielles (de 0 à 500 Pa) qui dépasse largement la norme canadienne (jusqu'à 250 Pa, voir la Figure 2). De plus, l'essai est effectué sans relâcher la pression entre deux niveaux de performance, et le débit d'eau (1 L/min/m^2) est beaucoup plus bas que celui utilisé au Canada et aux États-Unis. La Figure 2 montre que les fenêtres de catégorie commerciale renforcée aux États-Unis doivent être étanches à l'eau sous des pressions statiques différentielles plus élevées que celles exigées dans les normes canadiennes.

Il se peut que les futures révisions de la norme canadienne comprennent une classification des fenêtres basée sur la pression de l'eau de pluie due au vent dans différentes localités et climats du Canada. Pour obtenir plus de renseignements, voir l'Annexe A.

Résistance aux surcharges dues au vent

But

Le but est de déterminer la rigidité des éléments du châssis et des meneaux, et de vérifier la résistance d'une fenêtre sujette à des pressions statiques différentielles extrêmes. Cet essai ne cherche pas à éprouver la résistance du verre à moins que certaines caractéristiques inhabituelles de la fenêtre entraînent le bris du verre.

Appareillage et méthode d'essai

L'appareillage d'essai de base comprend :

- une chambre d'essai avec une ouverture pour installer l'échantillon,
- un dispositif permettant de maintenir une différence de pression d'air de part et d'autre de la fenêtre (infiltration et exfiltration),
- un dispositif de mesure de la différence de pression de part et d'autre de la fenêtre,
- des jauges pour mesurer les flèches des éléments du châssis ou des meneaux (voir la Figure 3).

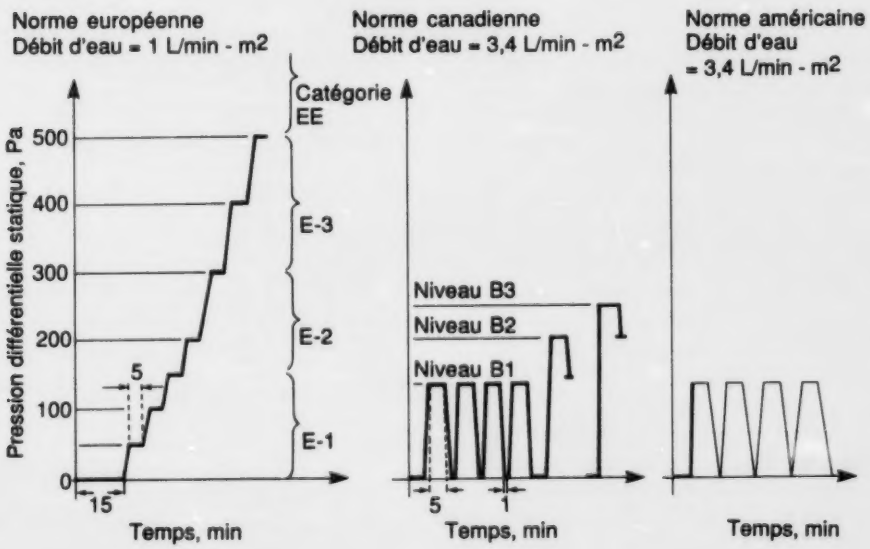


Figure 2. Comparaison des normes.

Exigences de performance

Les fenêtres sont classées en fonction de la pression statique différentielle maximale qu'elles peuvent supporter (pendant 1 min ± 5 secondes) sans produire une flèche supérieure à 1/175 de la longueur de l'élément (20 mm max.) pour les meneaux et de 1/50 de leur longueur (25 mm max.) pour les éléments du châssis. De plus, à la fin de l'essai, il ne doit pas y avoir de rupture, de défaillance ni de déformation permanente d'aucune partie de la fenêtre. La classification des fenêtres en catégories est établie selon les pressions différentielles comme indiqué au Tableau 6. L'essai est effectué conformément à la norme E 330–84[17] de l'ASTM.

Tableau 6 Catégories, résistance aux surcharges dues au vent

Catégorie de fenêtre	Pression différentielle statique de part et d'autre de la fenêtre (kPa)
C1	± 1,5
C2	± 2,0
C3	± 2,5

Commentaires

Une norme européenne (Norme française P20–302)[18] indique :

a) que sous une pression statique différentielle de 500 Pa, la flèche des éléments du châssis ne doit pas dépasser 1/200 de la portée (pour les fenêtres des habitations),

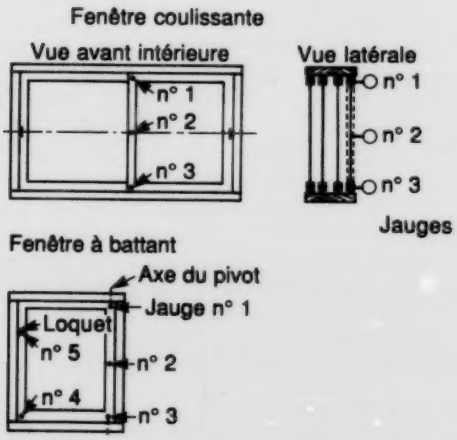


Figure 3. Emplacement des jauges.

b) que sous la pression statique différentielle d'essai (catégorie V1, 500 Pa et catégorie V2, 1000 Pa), les éléments de châssis retenant un vitrage isolant ne doivent pas fléchir de plus de 1/150 de leur portée (pour les fenêtres des bâtiments commerciaux).

Une fenêtre canadienne qui est classée C2 d'après ses caractéristiques répondra automatiquement au critère (a) précédent. Toutefois, quand des vitrages isolants sont utilisés, la même fenêtre canadienne peut ne pas satisfaire à l'exigence de la catégorie V2 de la norme européenne.

Les normes américaines (AAMA 101–85[19] et AAMA 101V–86,[20] utilisant des pressions différentielles de 1077, 1437 et 2873 Pa) ne comportent pas d'exigences particulières concernant la flèche admissible pour une pression d'essai donnée. Les normes américaines exigent seulement qu'il n'y ait pas de déformation permanente de tout élément du dormant, du châssis ou du ventilateur de plus de 0,4 pour 100 de sa portée.

En utilisant le Supplément du Code national du bâtiment du Canada 1985 pour déterminer la pression nominale pour une fenêtre, la pression d'essai requise pour la rupture peut dépasser la catégorie C3 existante (pression d'essai = 1,5 × pression de calcul, où 1,5 est un coefficient de sécurité).

Pour éliminer de tels écarts, les sections révisées de la norme A440 traitant de la résistance structurale comprendront l'évaluation de deux critères particuliers : la résistance aux surcharges dues au vent (flèche) et la résistance aux surcharges dues au vent (rupture).

Le guide de l'utilisateur qui sera annexé à la norme CAN3–A440–M84 pourrait donner une méthode permettant à l'utilisateur de déterminer la catégorie de fenêtre requise pour une localité donnée. Cette méthode tient compte des facteurs suivants : dimensions du bâtiment, localité, hauteur de la fenêtre posée, coefficient de pression et coefficient de rafale du vent. Des pressions d'essai calculées par ordinateur pour diverses hauteurs au-dessus du niveau du sol correspondant aux pressions de référence (probabilité de 1/10 par an) allant de 0,2 kPa à 1 kPa, par écarts de 0,05 kPa, seront également fournies.

La norme actuelle ne contient pas d'exigences pour limiter les flèches verticales des traverses. Des conditions de défaillance plus sévères pour les traverses (déformation et flèche) pourraient être ajoutées.

Résistance à la condensation

But

Cet essai s'applique uniquement aux fenêtres comprenant un châssis ou des éléments de dormant métalliques, ou les deux, de sorte qu'une coupure thermique est nécessaire pour éviter la conduction thermique à travers le métal. Il s'agit notamment de fenêtres comportant des éléments de châssis ou de dormant en métal, ou les deux, revêtus d'un autre matériau, et non de fenêtres comportant un demi-châssis extérieur et un demi-châssis intérieur reliés par un dormant en bois.

L'efficacité de la coupure thermique est mesurée par la température différentielle maximale entre la vitre intérieure et les éléments du dormant ou du châssis. Plus la température différentielle mesurée est petite, plus la coupure thermique est efficace.

Appareillage et méthode d'essai

Comme le montre l'illustration de la Figure 4, l'appareillage d'essai comprend :

- une chambre d'essai avec une ouverture pour installer l'échantillon,
- un moyen permettant de projeter de l'air froid à la surface extérieure de l'échantillon,
- un moyen permettant de contrôler les températures de l'air extérieur et intérieur,
- un moyen permettant de mesurer la pression différentielle de part et d'autre de l'échantillon,
- des thermocouples pour mesurer la température de l'air et des surfaces.

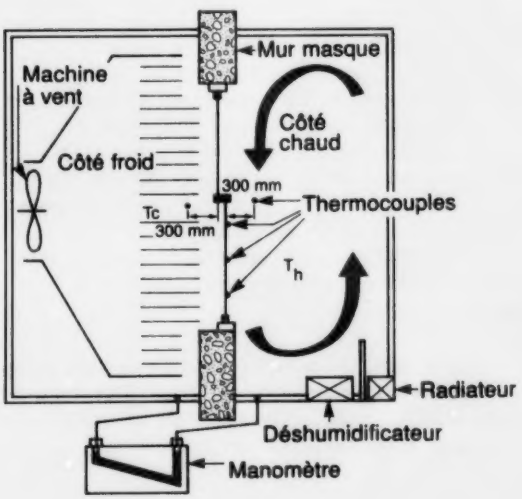


Figure 4. Appareillage de contrôle de la résistance à la condensation.

Exigences de performance

Les fenêtres sont classées en fonction de la différence de la température maximale calculée (ΔT) entre la température moyenne minimale de la vitre intérieure (T_A) et la température minimale de surface du métal intérieur (T_B), sur la base d'une différence de température de l'air de 50 °C entre les côtés chaud et froid à l'équilibre (voir la Figure 5 pour l'emplacement des thermocouples).

$$(\Delta T)_{cal} = 50 \times T_1/T_2$$

où

$(\Delta T)_{cal}$ = différence de température maximale calculée (°C)

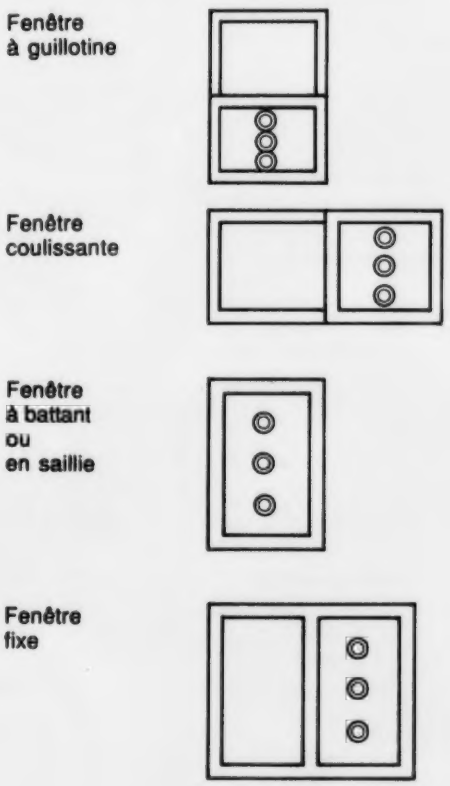


Figure 5. Emplacement des thermocouples pour le calcul de la température moyenne du verre, vue intérieure.

T_1 = $T_A - T_B$ dans les conditions d'essai (°C)
T_2 = différence de température d'air mesurée entre les côtés chaud et froid (°C).

Le Tableau 7 donne le classement des fenêtres en catégories selon le type de vitrage et le $(\Delta T)_{cal}$.

Tableau 7 Catégories, résistance à la condensation

Catégorie de fenêtre	Différence de température maximale calculée (°C)	
	Vitrages isolants	Autres fenêtres
D1	9	7
D2	4	4

Commentaires

Cet essai permet de comparer des dormants et châssis différents à un vitrage «normalisé». Les exigences de cet essai visent à réduire le plus possible la différence de température entre le vitrage et les éléments du dormant et du châssis. Cela signifie que si la performance thermique du vitrage est améliorée, la performance relative du dormant ou du châssis diminue, ce qui conduit à un classement inférieur. Par contre, si on diminue la performance thermique du vitrage sans modifier celle du dormant et du châssis, la nouvelle fenêtre pourrait obtenir un classement supérieur. Ces anomalies nécessitent une révision de l'essai actuel de résistance à la condensation.

Une modification majeure de cet essai est prévue, ainsi que de la classification des fenêtres selon leur résistance à la condensation. Pour en savoir davantage sur les changements proposés, voir l'Annexe B.

Résistance à l'effraction (facultatif), ASTM F 588–85

But

Les vols par effraction sont les crimes les plus fréquents en Amérique du Nord. Leur nombre augmente sans cesse et ils portent atteinte à un nombre croissant de propriétaires de maisons. Les éléments de l'enveloppe du bâtiment les plus vulnérables à l'entrée par effraction sont les fenêtres directement accessibles aux voleurs, les portes avant et arrière, les portes de garage et les portes-patio.

Les méthodes d'essai décrites dans la norme F 588–85[22] de l'ASTM visent à mesurer la résistance des fenêtres aux tentatives d'effraction (autres que le bris du vitrage) par des voleurs occasionnels non expérimentés. Pour se protéger des voleurs plus expérimentés, il faut des protections plus sophistiquées, comme des alarmes ou des systèmes de détection et de communication ou encore des vitrages de sécurité spéciaux.

Appareillage et méthode d'essai

L'appareillage d'essai consiste en une ossature d'acier supportant un mur à ossature de bois dans lequel une ouverture est prévue pour l'installation de la fenêtre à l'essai. Le montage permet d'appliquer plusieurs forces simultanément sur une surface de travail de 2,75 m (largeur) sur 3 m (hauteur). Les charges sont appliquées aux endroits appropriés selon les directions et les forces spécifiées dans la norme.

La fenêtre à l'essai est installée dans l'ossature de bois du mur conformément aux instructions du fabricant.

L'essai comprend les étapes suivantes :

- un essai de manipulation,
- un essai de manipulation au moyen d'outils,
- l'application de charges statiques en plusieurs endroits de l'ensemble,
- une répétition des essais de manipulation à la main et au moyen d'outils.

Exigences de performance

La norme F 588–85 de l'ASTM propose quatre catégories de sécurité (10, 20, 30 et 40). La catégorie 10 est la plus basse et la catégorie 40, la plus haute. Seule la catégorie 10 est exigée dans la norme actuelle. Le Tableau 8 donne les valeurs des forces et des durées d'application pour chaque catégorie. Pour être classée dans une catégorie, la fenêtre à l'essai doit satisfaire à toute les étapes de l'essai.

Commentaires

La norme CAN3–A440–M84 mentionne seulement la première catégorie proposée par la norme F 588–85 de l'ASTM. Les révisions de la norme canadienne existante proposent une augmentation du nombre de catégories et recommandent que l'essai de résistance à l'effraction devienne obligatoire. Les changements proposés au Code national du bâtiment du Canada rendraient obligatoires les exigences relatives à la résistance à l'effraction.

Tableau 8 Exigences de performance, essai d'effraction

Identification de la charge et de la durée Symbole	Unité	Catégorie 10	Catégorie 20	Catégorie 30	Catégorie 40
T1	min	5	5	10	10
T2	min	5	5	10	10
L1	N	668	890	1112	1335
L2	N	334	445	556	668
L3	N	111	156	222	289

Chute libre (fenêtres à guillotine avec arrêts intermédiaires)

But

Le but de cet essai consiste à vérifier qu'un châssis qu'on laisse tomber s'arrête au prochain enclenchement sans endommager la fenêtre ou blesser l'utilisateur.

Appareillage et méthode d'essai

L'essai consiste à relever tous les châssis jusqu'à leur position d'arrêt la plus haute, puis à relâcher les poignées d'arrêt une à une pour laisser les châssis descendre un à un en chute libre.

Exigences de performance

Après la chute libre, le châssis doit s'arrêter à la prochaine position d'arrêt, ne doit pas se briser ni défaillir, et aucun élément de la fenêtre ne doit se déformer d'une façon permanente qui entraînerait un mauvais fonctionnement ou empêcherait la manœuvre de la fenêtre. Cet essai est répété cinq fois pour chaque châssis manœuvrable.

Blocage (fenêtres coulissantes seulement)

But

Cet essai permet d'évaluer la tenue d'un élément de châssis manœuvrable (traverse de manœuvre ou traverse de rencontre) lorsqu'une force excessive est appliquée au dispositif de manœuvre (poignée). Par exemple, si l'humidité givre sur les bordures du châssis, une force plus importante est nécessaire pour l'ouvrir. Dans ce cas, il ne faut pas que le châssis se sépare du vitrage.

Appareillage et méthode d'essai

La Figure 6 illustre un montage d'essai pour les deux types de fenêtres coulissantes. L'essai est effectué sur la traverse de manœuvre et sur la traverse de rencontre si cette dernière peut servir de poignée. Le

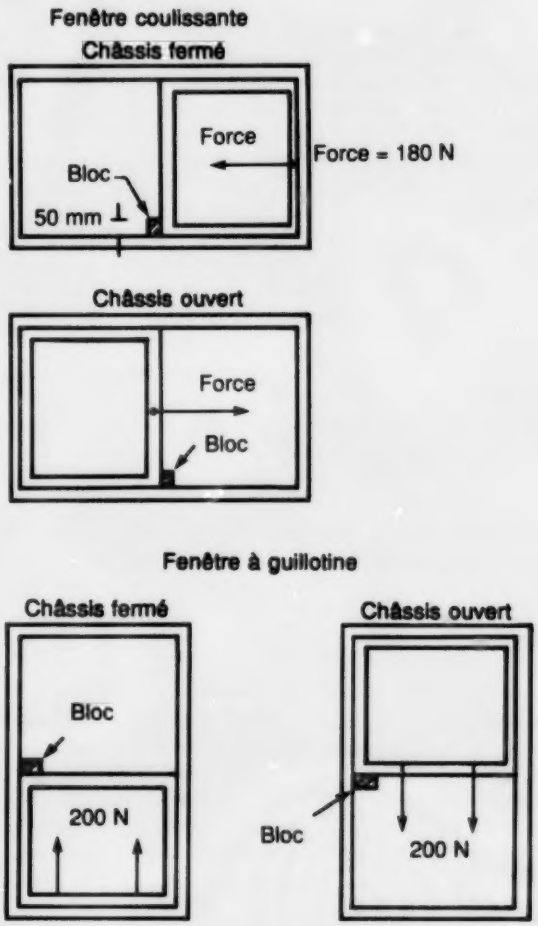


Figure 6. Essai de blocage.

déplacement relatif de l'élément du châssis par rapport à la vitre est mesuré à mi-portée (voir la Figure 7).

Exigences de performance

Sous la force prescrite (400 N pour une fenêtre à guillotine et 180 N pour une fenêtre coulissante), chaque châssis doit satisfaire aux exigences suivantes :

- le déplacement relatif initial de l'élément de châssis par rapport à la vitre ne devrait pas dépasser 75 pour 100 de la valeur nominale d'enfoncement du vitrage, mesuré à mi-portée de l'élément. Le déplacement relatif résiduel, cinq minutes après que la force d'essai a été retirée, ne devrait pas dépasser 50 pour 100 de la valeur nominale d'enfoncement,
- après l'essai, les poignées de manœuvre devraient rester fermement fixées à l'élément du châssis et ne devraient présenter aucun signe de défaillance ou de déformation permanente,
- le vitrage ne devrait pas se briser.

Résistance et rigidité du châssis (fenêtres à battants seulement)

But

Cet essai permet d'évaluer la tenue d'une fenêtre à battant lorsqu'une force verticale additionnelle orientée vers le bas est appliquée sur la rive libre du châssis ouvert. Bien qu'il s'agisse d'une force inhabituelle au cours de l'utilisation d'une fenêtre, le châssis doit y résister au cas où quelqu'un saisirait le châssis en position d'ouverture et tirerait dessus.

Appareillage et méthode d'essai

L'essai consiste à exercer vers le bas une force verticale de 265 N, à une distance de 50 mm du côté intérieur de la rive libre du châssis ouvert à 90° ou à la limite de sa course, suivant l'ouverture la moins grande. La Figure 8 représente une fenêtre typique en situation d'essai.

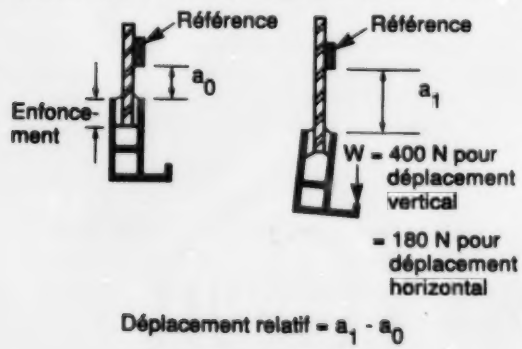


Figure 7. Essai de blocage.

Exigences de performance

La fenêtre doit satisfaire aux exigences suivantes :

- la flèche verticale de l'angle extérieur le plus bas du châssis ne doit pas dépasser 5 mm lorsque la charge est appliquée,
- après l'essai, ni le dormant ni le châssis ne devraient présenter de signe de défaillance des matériaux ou une déformation permanente qui nuirait au bon fonctionnement de la fenêtre.

Résistance et rigidité du châssis (fenêtres en saillie seulement)

But

Cet essai permet d'évaluer la tenue d'une fenêtre en saillie lorsque le châssis est ouvert et qu'une force est appliquée perpendiculairement à son plan en direction de sa fermeture tandis qu'un coin du châssis est bloqué en position ouverte. Ce cas peut se présenter lorsque le dispositif de fermeture qui maintient l'ouvrant est coincé alors que quelqu'un tente de fermer le châssis.

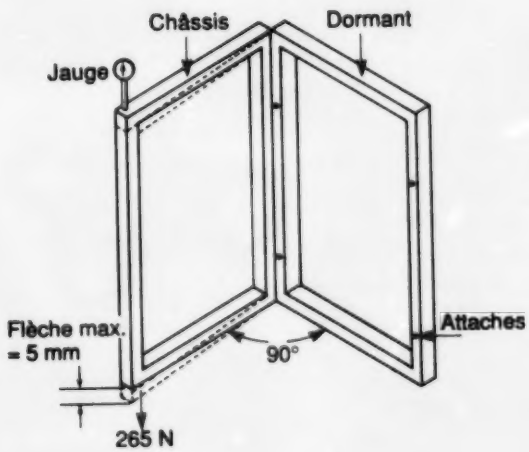


Figure 8. Essai de déformation diagonale, fenêtre à battant.

Appareillage et méthode d'essai

La Figure 9 représente une fenêtre à l'essai. L'essai consiste à ouvrir le châssis selon un angle de 45° ou selon sa course maximale (suivant l'ouverture la moins grande) et à bloquer la rive libre du châssis opposée aux charnières afin d'empêcher tout mouvement dans le sens de la fermeture. Une force de 60 N est alors appliquée dans le sens de la fermeture à mi-portée de l'élément du châssis opposé aux charnières et perpendiculairement au plan de la vitre. La flèche du coin libre est alors mesurée.

Exigences de performance

La fenêtre doit satisfaire aux exigences suivantes :

- la flèche du coin libre ne doit pas dépasser 18 mm lorsque la charge est exercée,
- après l'essai, ni le dormant ni le châssis ne doivent présenter de signe de rupture des matériaux ou de déformation permanente qui nuirait à la manœuvre de la fenêtre.

Résistance des moustiquaires (fenêtres avec châssis ouvrants seulement)

But

Cet essai permet d'évaluer les fixations d'une moustiquaire sur le dormant d'une fenêtre lorsqu'une force est exercée perpendiculairement à son plan vers l'extérieur. Ce cas peut se produire lorsqu'une personne pousse accidentellement sur une moustiquaire ou lance un objet contre elle. Les moustiquaires ne sont pas destinées à former des écrans ou à servir de sécurité pour retenir des objets lourds.

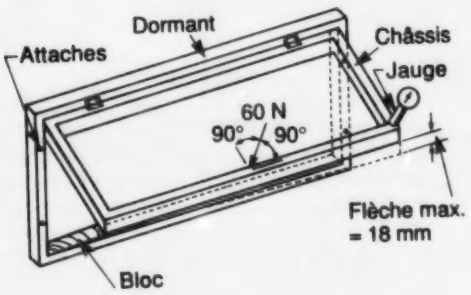


Figure 9. Essai de gauchissement, fenêtre en saillie.

Appareillage et méthode d'essai

Cet essai consiste à placer la fenêtre avec sa moustiquaire en position horizontale, puis à appliquer une force de 60 N (pour une moustiquaire standard) ou de 330 N (pour une moustiquaire robuste) au centre de la moustiquaire (la charge est répartie uniformément sur une aire circulaire de 300 mm de diamètre) en direction de l'extérieur de la fenêtre. Tous les obstacles qui pourraient modifier l'affaissement de la moustiquaire sont retirés. La charge est appliquée pendant une minute.

Exigences de performance

Une moustiquaire est d'une catégorie donnée (standard ou robuste) si, à l'essai, elle satisfait aux exigences suivantes :

- elle reste solidement fixée à la fenêtre et sa fixation ne présente aucun signe de défaillance ni de déformation permanente,
- son grillage ne se déchire pas et reste fermement fixé à son châssis,
- les éléments du châssis de la moustiquaire et les assemblages d'encoignure ne présentent aucun signe de défaillance ni de déformation permanente.

Arrachement du châssis (fenêtres en vinyle seulement)

But

Cet essai permet d'évaluer la rigidité et l'adhérence des éléments de châssis en PCV à la vitre lorsqu'on exerce une force pour retirer ces éléments de la vitre adjacente.

Appareillage et méthode d'essai

La Figure 10 représente les éléments de l'appareillage d'essai. L'essai consiste à appliquer une charge donnée (voir le Tableau 9 et la Figure 11) au centre de chaque élément du châssis et à mesurer la flèche résultante.

Exigences de performance

Lorsqu'ils sont soumis aux charges du Tableau 9, les éléments ne doivent pas présenter une flèche dépassant 75 pour 100 de l'enfoncement nominal de la

Tableau 9 Charges pour l'essai d'arrachement du châssis

Type de fenêtre	Élément du châssis	N° de référence (voir Figure 11)	Charge (kg)		
			vitrage à parclose	vitrage par encastrement	demi-encadrement
À guillotine	traverse de levage	1		45	45
	traverse supérieure	2		27	27
	traverse de rencontre	3	27		
	traverse ou montant de battement	4		45	45
	montant	5		27	27
Coulissante	traverse inférieure	1		27	27
	traverse supérieure	2		27	27
	traverse de manœuvre, montant de manœuvre ou traverse de rive	3	27	45	45
	traverse de rencontre ou montant de battement	4		45	45
À battant	traverse inférieure	1			
	traverse supérieure	2	27	45	s/o
	montant	5			
En saillie	traverse inférieure	1			
	traverse supérieure	2	27	45	s/o
	montant	5			

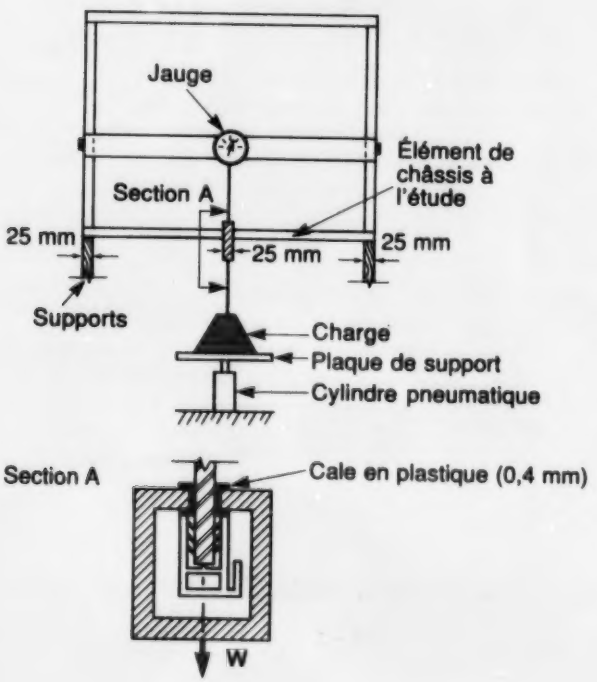


Figure 10. Essai d'arrachement du châssis, fenêtre en vinyle.

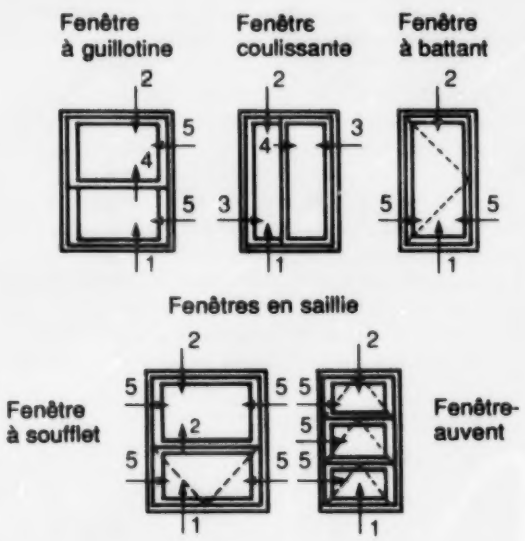


Figure 11. Essai d'arrachement du châssis, emplacement de la charge.

vitre par rapport à l'élément. La charge est appliquée pendant une minute.

Fenêtres composées ou combinées

Une fenêtre composée est un ensemble de deux ou plusieurs types de fenêtres montées dans le même dormant. La Figure 12 représente une fenêtre composée typique.

Une fenêtre combinée est un ensemble de deux ou plusieurs types de fenêtres qui sont reliées ensemble par leurs dormants respectifs. La Figure 13 représente une fenêtre combinée typique.

La norme A440 existante renvoie aux fenêtres composées et combinées ainsi :

Lorsque le fabricant souhaite démontrer la conformité à la présente norme de fenêtres composées constituées d'un dormant et de deux fenêtres ou plus, la conformité de chacun de ces éléments ayant été démontrée individuellement, il suffit de prouver que les meneaux séparant les fenêtres sont suffisamment résistants et rigides pour supporter ces fenêtres lorsqu'elles sont soumises à la pression du vent déterminée pour la catégorie de fenêtres en question. Pour ce faire, la fenêtre composée peut être soumise à l'essai de résistance aux surcharges dues au vent ou les meneaux peuvent être éprouvés comme une poutre.

Cet alinéa soulève de nombreuses questions que l'édition de la norme de 1989 tentera de résoudre. Ces questions sont les suivantes :

- Comment peut-on s'assurer que les éléments raccordés sont continus sur leur longueur et aux joints (étanchéité à l'air et étanchéité à l'eau)?
- Le fonctionnement de la fenêtre-auvent est-il perturbé si le poids de la fenêtre du haut produit une flèche supérieure à l'espace libre entre la traverse horizontale et le châssis de la fenêtre-auvent?
- Quelle devrait être la flèche verticale maximale admissible pour la traverse intermédiaire?
- Si la traverse est éprouvée comme une poutre, où les charges devraient-elles être appliquées? Quelle est la méthode de calcul à employer?

Pose des fenêtres à pied d'œuvre

La pose des fenêtres est traitée de façon générale dans l'annexe non obligatoire A de la norme. On trouvera davantage de détails sur la pose des fenêtres dans l'exposé intitulé *Intégration de la fenêtre à l'enveloppe du bâtiment.*

Modifications futures de la norme CAN3–A440–M84

Les modifications et additions de la norme existante peuvent être divisées en deux groupes selon qu'il s'agisse de révisions à court terme ou à long terme.

Pour les révisions à court terme, les modifications suivantes pourraient être effectuées :

- l'essai de la résistance à la condensation pourrait être amélioré, et les fenêtres en bois et en PCV pourraient en faire partie et satisfaire aux mêmes exigences que les autres,
- les méthodes d'essai des fenêtres composées et combinées pourraient être intégrées à la norme,
- le critère de durabilité pourrait être obligatoire pour des éléments tels que les chariots, les coupe-froid, les

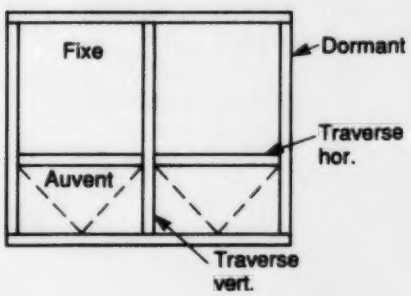


Figure 12. Fenêtre composée.

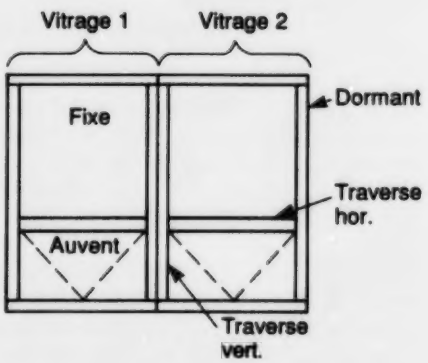


Figure 13. Fenêtre combinée.

contre-poids de châssis, les ferrures (les leviers et les manivelles de manœuvre, les verrous, les dispositifs de blocage en position d'ouverture, etc.),
- les essais d'exfiltration d'air pourraient devenir obligatoires,
- des nouvelles catégories de facilité de manœuvre pourraient être introduites,
- des catégories plus élevées d'étanchéité à l'eau et de résistance aux surcharges dues au vent pourraient être ajoutées,
- un guide de l'utilisateur pourrait être inclus. Ce guide fournirait les données et les méthodes permettant de déterminer la catégorie d'une fenêtre. Il traiterait des critères suivants : étanchéité à l'air, facilité de manœuvre, étanchéité à l'eau, surcharges dues au vent et condensation.

Pour les révisions à long terme, les modifications suivantes pourraient être effectuées :

- mesure de la résistance thermique globale d'une fenêtre (valeur RSI),
- mesure de la transmission du son par une fenêtre,
- mesure de l'étanchéité à l'air pour plusieurs différences de température,
- essai d'exposition cyclique aux intempéries avant tout essai visant à démontrer la conformité à une exigence de performance.

Résumé

Cet exposé a évalué une fenêtre en tant que système indépendant. La revue de la norme CAN3–A440–M84 a montré que la fenêtre est soumise à une série d'essais concluants en laboratoire pour s'assurer de sa conformité aux exigences minimales comme indiqué dans la norme.

Beaucoup d'autres sujets seront examinés, analysés et présentés à l'Association canadienne de normalisation pour servir éventuellement aux futures éditions de la norme. Une norme bien élaborée, basée sur les meilleures connaissances techniques disponibles, aidera l'industrie canadienne de la fenêtre à être davantage compétitive sur les marchés intérieur et extérieur.

Références

1. Association canadienne de normalisation, *Fenêtres*, CAN3–A440–M84, 42 p.
2. Office des normes générales du Canada, *Fenêtres en profils d'aluminium, à guillotine et coulissantes, qualité robuste*, 63–GP–1M, 1977.
3. Office des normes générales du Canada, *Fenêtres en profilés d'aluminium, à guillotine et coulissantes de qualité moyenne*, 63–GP–2M, 1976.
4. Office des normes générales du Canada, *Fenêtres en profilés d'aluminium, à guillotine et coulissantes, qualité standard*, 63–GP–3M, 1976.
5. Office des normes générales du Canada, *Fenêtres en acier, à guillotine et coulissantes, qualité standard*, 63–GP–5M, 1976.
6. Office des normes générales du Canada, *Fenêtres en acier, à guillotine et coulissantes, qualité moyenne*, 63–GP–6M, 1976.
7. Office des normes générales du Canada, *Croisées en profilés d'aluminium, qualité robuste*, 63–GP–7M, 1977.
8. Office des normes générales du Canada, *Fenêtres en saillie, en métal, qualité moyenne*, 63–GP–8M, 1977.
9. Office des normes générales du Canada, *Fenêtres en profilés d'aluminium, à demi-châssis, à guillotine, qualité moyenne*, 63–GP–9M, 1978.
10. Office des normes générales du Canada, *Blocs-fenêtres métalliques*, 63–GP–11M, 1977.
11. Office des normes générales du Canada, *Fenêtres fixes en métal* 63–GP–12M, 1977.
12. Office des normes générales du Canada, *Blocs-fenêtres en aluminium, qualité standard*, 63–GP–13M, 1978.
13. Association canadienne de normalisation, Fenêtres en vinyle, A274–M1980.
14. Association canadienne de normalisation, *Fenêtres en bois*, O132.1–M1977.
15. American Society for Testing and Materials, *Test method for rate of air leakage through exterior windows, curtain walls, and doors*, E 283–84, 1984.
16. American Society for Testing and Materials, *Test method for water penetration of exterior windows, curtains walls, and doors by cyclic static air pressure differential*, E 547–86, 1986.
17. American Society for Testing and Materials, *Test method for structural performance of exterior windows, curtain walls, and doors by uniform static pressure difference*, E 330–84, 1984.
18. Association française de normalisation, *Caractéristiques des fenêtres*, Norme française homologuée P20–302, 1980.
19. American Architectural Manufacturers Association, *Voluntary specification for aluminum prime windows and sliding glass doors*, AAMA 101–8501, 1985.
20. American Architectural Manufacturers Association, *Voluntary specification for poly(vinyl chloride) (called PVC) prime windows and sliding glass doors*, AAMA 101V–86, 1986.

Annexe A

Changements proposés pour l'essai d'étanchéité à l'eau

Le comité ACNOR effectue, en coopération avec Environnement Canada, une étude des indices de pluie battante (IPB) pour le climat canadien. Une méthode d'analyse climatologique basée sur la répartition de la fréquence des pressions du vent au cours des pluies à une hauteur de 10 m au-dessus du sol a été élaborée. La répartition des pressions (avec une probabilité d'occurrence maximale acceptable) servira de pression différentielle pour l'essai d'étanchéité à l'eau. Pour tenir compte des hauteurs au-dessus de 10 m, un coefficient de hauteur est prévu dans l'analyse.

Une pluie de 1,8 mm/h a été retenue. À cause de l'amplification créée par le vent sur une surface verticale, cette quantité d'eau est suffisante pour mouiller la surface extérieure de la fenêtre. Une pression de vent prise pendant une minute en moyenne à toutes les heures a été retenue pour représenter la pression du vent. Aucune correction n'a été faite pour tenir compte de l'exposition du bâtiment, du terrain et des coefficients de pression afin de simplifier la méthode de calcul.

Le Tableau A-1 fournit les indices de pluie battante pour plusieurs localités au Canada. La différence de pression requise pour l'essai selon diverses pressions de référence en fonction de la hauteur de la fenêtre posée ferait l'objet d'un tableau dans la norme.

Le guide de l'utilisateur proposé pour la norme CAN3–A440–M84 contiendrait les indices de pluie battante de référence pour 640 localités canadiennes. De plus, une carte d'équipressions indiquerait les variations de 10 Pa en 10 Pa, pour aider l'utilisateur dans les localités ne figurant pas sur la liste.

Comme le montre le Tableau A-1, les valeurs existantes devraient être modifiées compte tenu de l'étanchéité à l'eau. Le Tableau A-2 donne les nouvelles valeurs proposées pour l'étanchéité à l'eau.

Tableau A-1 Indices de pluie battante

Localité	Pression de référence (Pa)
Port-aux-Basques	495
St. John's, Terre-Neuve	477
Charlottetown	362
Halifax	316
Saint John, Nouveau-Brunswick	296
Winnipeg	237
Montréal	225
Saskatoon	207
Toronto	179
Edmonton	155
Vancouver	149
Kamloops	117
Yellowknife	114
Whitehorse	56

Tableau A-2 Nouvelles catégories proposées

Catégorie	Pression d'essai d'étanchéité à l'eau (Pa)
B1	150
B2	200
B3	300
B4	400
B5	500
B6	600
B7	700

Annexe B

Changements proposés pour l'essai de résistance à la condensation

L'essai de la résistance à la condensation proposé vise à comparer la résistance des fenêtres à la condensation sur les surfaces intérieures (côté chaud) dans des conditions d'essai normalisées.

Les résultats fourniront un indice de température (I) applicable à la vitre et aux éléments du dormant de la fenêtre. L'indice de température permettra de prédire la résistance à la condensation d'une fenêtre dans d'autres conditions d'essai (humidité relative intérieure (HR) et température extérieure à bulbe sec).

La méthode de l'essai de résistance à la condensation proposé indique comment la fenêtre à l'essai doit être posée dans une chambre d'essai simulant les conditions atmosphériques intérieure et extérieure. La méthode spécifie aussi les mesures de température nécessaires pour déterminer séparément l'indice de température du vitrage et du dormant.

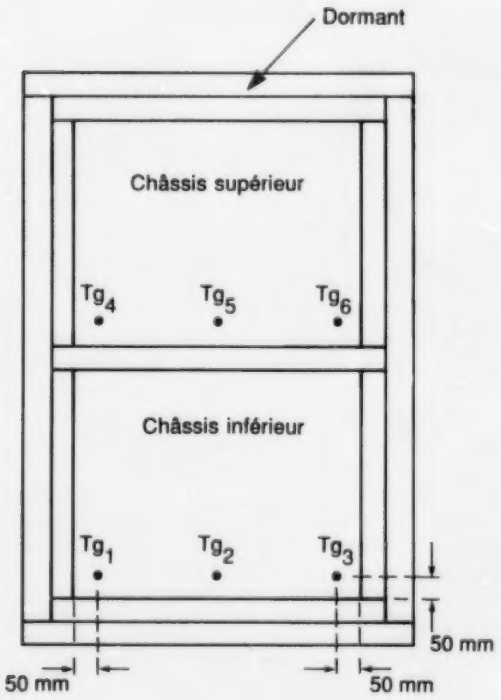


Figure B-1. Emplacement des thermocouples.

Au cours de l'essai, une fois l'état d'équilibre atteint, les températures moyennes (cinq observations consécutives) sont enregistrées : côté intérieur (T_h), côté extérieur (T_c), température minimale du dormant (T_f) et température minimale de la vitre (T_g). T_g est la moyenne de trois lectures de température sur la surface la plus froide de la vitre (Figure B-2).

Calcul de l'indice de température (I) :

$$I = (T - T_c)/(T_h - T_c) \times 100\ \%$$

où T est le plus petit de T_g et T_f. Par conséquent :

$$I_g = (T_g - T_c)/(T_h - T_c) \times 100\ \%, \text{ et}$$

$$I_f = (T_f - T_c)/(T_h - T_c) \times 100\ \%$$

La méthode suivante montre comment choisir un indice de température (I) pour une fenêtre donnée dans une localité donnée au Canada :

1. Choisir l'humidité relative de calcul intérieure à maintenir sans provoquer de condensation :
   - les critères de conception peuvent être ou non différents pour les éléments du châssis et la surface de la vitre,
   - la température de calcul intérieure à bulbe sec (T_h) utilisée est de 20 °C;
2. Choisir la température de calcul d'hiver extérieure (T_c) pour l'emplacement de la fenêtre, par exemple -15 °C. Cette valeur peut être trouvée dans le Supplément du Code national du bâtiment du Canada;

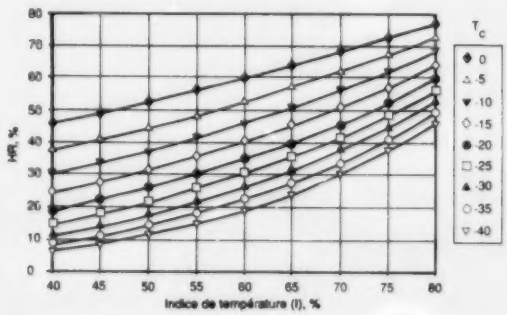


Figure B-2. Rapport entre l'indice de température et l'humidité relative pour différentes températures hivernales de calcul.

3. Utiliser la Figure B-2 ainsi :
   a) repérer les valeurs d'humidité relative (HR) trouvées à l'étape 1 sur l'axe vertical, par exemple :
   HR_{vitre} max. = 30 %
   $HR_{dormant}$ max. = 30 %;
   b) aller horizontalement jusqu'à la température de calcul d'hiver extérieure choisie (T_c = -15 °C) (une interpolation linéaire est permise);
   c) à partir de l'intersection du HR admissible maximal et T_c, descendre verticalement pour lire dans chaque cas l'indice minimal de température requis (I) :
   (I_{vitre}) min. = 48 %
   ($I_{dormant}$) min. = 48 %

Le Tableau B-1 donne l'indice de température (I) pour diverses localités canadiennes.

Tableau B-1 Indice de température (I)

	Vancouver	Saskatoon	Winnipeg	Toronto	Montréal	Halifax	St. John's
Conditions de calcul intérieures							
T_i(°C)	20	20	20	20	20	20	20
HR(%)	35	35	35	35	35	35	35
Température de calcul extérieure (2 1/2 %)							
T_c(°C)	–7	–35	–33	–18	–23	–16	–14
I(%)	41	71	70	58	63	57	53

Intégration de la fenêtre à l'enveloppe du bâtiment

A. Patenaude, D. Scott et M. Lux

Introduction

Décrire en détail l'installation de fenêtres dans l'enveloppe du bâtiment exige une bonne compréhension de la manière dont les éléments de la fenêtre et du mur sont liés; en outre, il faut comprendre comment fonctionne ce système. Il faut assurer une continuité entre les éléments de la fenêtre et du mur afin de garantir la protection contre les intempéries, l'étanchéité à l'air et la résistance à l'écoulement de chaleur et à la diffusion de vapeur. Le type de fenêtre doit minimiser les risques de condensation sur les vitrages ou le dormant qui pourrait être causée par des mauvaises spécifications du dormant ou une mauvaise installation dans le mur. Les charges structurales verticales appliquées sur la fenêtre doivent être minimisées et les fenêtres doivent être suffisamment bien ancrées et soutenues dans l'ouverture brute afin d'assurer un transfert adéquat des surcharges dues au vent aux éléments de charpente du mur. Les joints et les ancrages entre l'enveloppe du bâtiment et la fenêtre doivent être conçus de manière à tenir compte du mouvement thermique de la fenêtre en fonction du reste du bâtiment.

Une bonne installation des fenêtres nécessite la participation de toute une équipe. Le fabricant doit comprendre quel niveau de rendement est exigé et connaître les détails de la configuration finale. L'architecte doit fournir les détails qui décrivent les joints ou raccords entre la fenêtre et le mur. Cette étape doit être réalisée d'une manière qui permette une bonne construction par l'entrepreneur ou les ouvriers. La vérification du comportement en service de la fenêtre est répartie entre le fabricant, l'architecte et l'entrepreneur général.

Continuité des éléments de l'ensemble mur–fenêtre

Le pare-air

Il faut que le pare-air soit continu le long de l'enveloppe du bâtiment afin de permettre un contrôle efficace des fuites d'air. Pour assurer cette continuité aux endroits où se trouvent les fenêtres, le concepteur doit être en mesure d'identifier les éléments du mur et de la fenêtre qui agissent comme pare-air. Les dessins doivent clairement indiquer comment ces éléments sont liés. Certains dormants facilitent grandement la réalisation du joint entre la fenêtre et le pare-air car ils disposent d'un espace permettant de les fixer à la charpente à l'aide d'agrafes. Cela permet au pare-air de maintenir une résistance contre la force du vent et de résister au fluage ou à la défaillance causée par la détérioration ou la rupture du joint d'étanchéité.

Le mur de maçonnerie illustré à la Figure 1 est constitué d'une membrane de bitume modifié renforcé auto-adhésive, assujettie au mur de remplissage en blocs de béton à l'aide de fixations mécaniques. Le maçon laisse une certaine longueur de membrane qui sera plus tard fixée mécaniquement à l'ossature à l'aide d'une section en «D». Cette section devient un profilé de finition pour l'ébrasement de la fenêtre. L'étanchéité à l'air dans la fenêtre est assurée par la section du dormant à l'intérieur de la coupure thermique et le joint d'étanchéité du vitrage au niveau du dormant. Dans le cas des habitations, on utilise souvent le polyéthylène pour réaliser l'étanchéité à l'air. L'étanchéité entre le dormant et le mur des fenêtres en bois, fréquemment utilisées dans la construction d'habitations, peut être réalisée en calfeutrant ou agrafant le polyéthylène au dormant de la fenêtre. Une méthode courante consiste maintenant à installer une bande de polyéthylène au pourtour des dormants, qui est ensuite reliée au pare-air

principal et agrafée derrière le revêtement de plaques de plâtre.

Protection contre les intempéries : limiter la pénétration de l'eau de pluie

L'étanchéité d'une fenêtre est fonction de ses caractéristiques et d'une bonne conception afin d'empêcher la pénétration de l'eau de pluie à la jonction des éléments de façade. Le bon fonctionnement du pare-air est essentiel pour garantir la résistance aux intempéries. La fenêtre commerciale de la Figure 1 utilise le principe de l'écran pare-pluie, c'est-à-dire que la ligne d'étanchéité assurée par le joint intérieur du vitrage au niveau du dormant est protégée par une cavité drainée vers l'extérieur dans laquelle se produit un équilibre de pression, dans la partie inférieure du vitrage isolant. La pluie est écartée de la fenêtre à l'aide d'une garniture d'étanchéité en néoprène ou EPDM, qui fonctionne efficacement dans la mesure où les trous d'évacuation dans la cavité sont larges en proportion des imperfections dans le joint d'étanchéité intérieur. Ainsi, on est assuré que la pression est égalisée le long de la garniture.

Le solin de la partie supérieure de la fenêtre doit détourner l'eau vers la surface du bâtiment. Il faut faire attention de choisir des matériaux pouvant résister à l'action rigoureuse de la truelle du maçon. L'installation du solin doit se faire au moment et à un emplacement bien choisis. Le calfeutrage à l'intersection du dormant de fenêtre et des matériaux adjacents assure une protection contre l'eau de pluie; il en sera question dans une autre section.

Les appuis de fenêtre qui surplombent une cavité externe dans les climats soumis à des cycles rapides de gel–dégel devraient être conçus de manière à ce que leur pente soit suffisante pour empêcher l'accumulation de neige et de glace, ou être suffisamment plats pour permettre une rétention de glace et une fonte contrôlée.

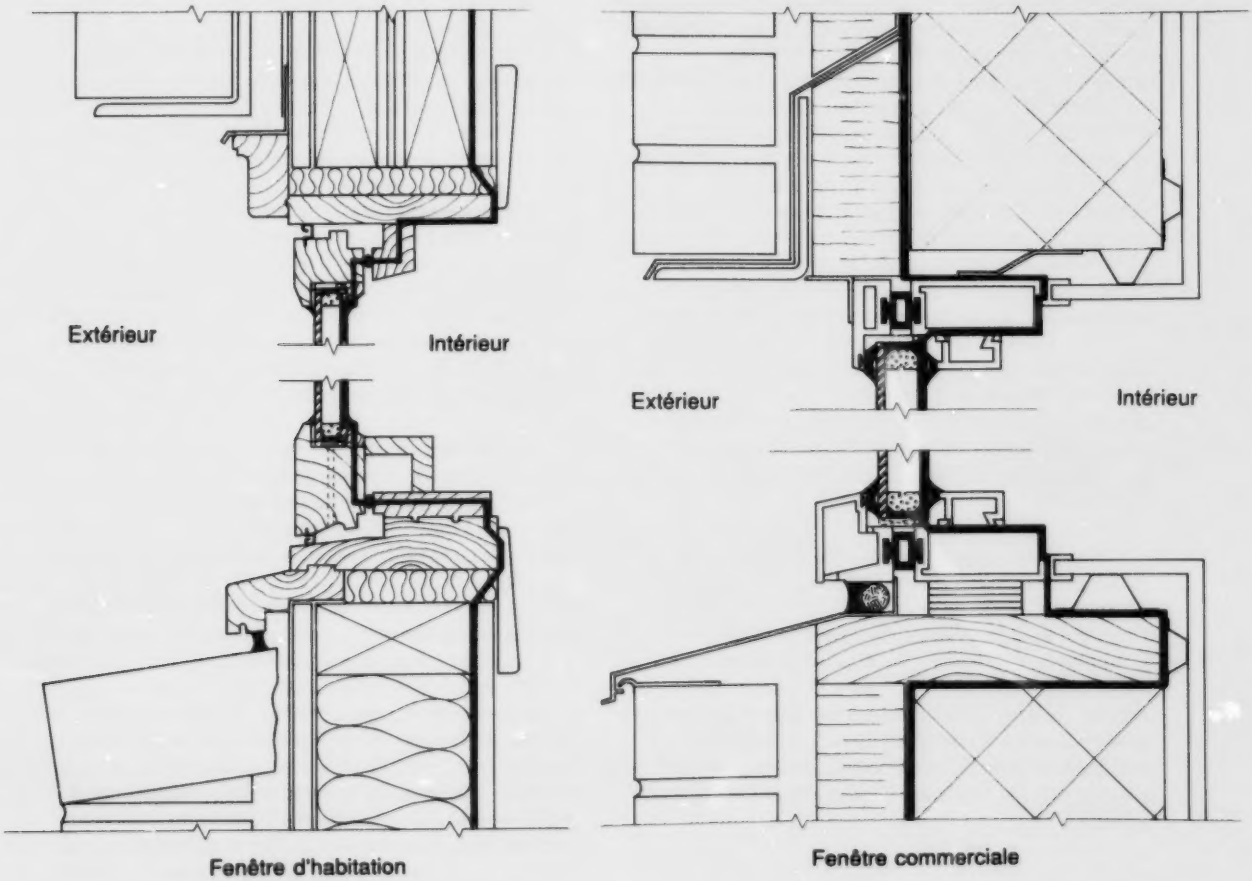


Figure 1. Continuité du pare-air, du pare-vapeur, de la protection contre les intempéries et de la résistance thermique entre la fenêtre et le mur.

Limitation de la diffusion de la vapeur d'eau

Si un contrôle adéquat de la diffusion de la vapeur d'eau est assuré le long de la partie opaque de l'enveloppe du bâtiment, la diffusion par une mince ouverture à la jonction fenêtre–mur est rarement importante.

Isolation thermique

La continuité de la barrière thermique est importante, principalement afin de réduire les risques de condensation sur les vitrages intérieurs et les revêtements intérieurs de finition, mais aussi pour des raisons qui touchent aux économies d'énergie, au confort intérieur et à l'environnement thermique. Il faut donc tenir compte de l'emplacement de l'isolant thermique en fonction de celui des vitrages et des revêtements intérieurs de finition. Il faut éviter d'installer des fenêtres dans les endroits froids. Cet aspect sera traité plus en détail dans la section suivante.

Performance thermique : réduire les risques de condensation

Caractéristiques des fenêtres

Durant les essais en laboratoire, un masque isolant entoure les fenêtres, ce qui réduit l'influence de facteurs externes sur la performance thermique du produit. Cependant, dans la pratique, de nombreux facteurs influent sur la température du vitrage et des composantes du dormant d'une fenêtre, et par conséquent sur les risques de condensation. Il faut examiner attentivement le dormant de la fenêtre afin d'identifier les problèmes que pourrait causer la condensation. Pour réduire ces problèmes, les concepteurs devraient chercher à maximiser la température de surface intérieure.

L'emplacement de la coupure thermique est très important en relation avec l'emplacement de la fenêtre dans le mur. Il faut faire en sorte d'éliminer l'infiltration d'air froid au-delà de la coupure thermique (Figure 2). La surface du dormant de la fenêtre exposée aux conditions extérieures et intérieures est importante. La surface du dormant exposée aux conditions extérieures devrait être moindre que celle exposée aux conditions intérieures. Ceci permettra aux températures de surface aux bords du vitrage et dans la partie intérieure du dormant d'être plus élevées, et donc de réduire les risques de condensation. De la même façon, la garniture d'étanchéité à l'extérieur du vitrage devrait être plus épaisse que celle du côté intérieur. Encore une fois, les températures de surface au pourtour du vitrage seront plus élevées et les risques de condensation seront réduits (Figure 3).

Il faut faire attention lorsqu'on combine des fenêtres selon des configurations qui entraînent un accroissement de la surface exposée du côté froid, comme dans le cas d'une fenêtre en baie. Une coupure thermique qui semble adéquate durant un essai à l'aide d'une fenêtre normale peut s'avérer inadéquate au niveau des risques de pertes de chaleur dans une configuration révisée (Figure 4).

Les rallonges de dormant en métal appuyées sur les dormants de la fenêtre du côté intérieur accentuent l'écoulement de chaleur vers le dormant à l'intérieur de la coupure thermique, augmentant ainsi la résistance à la condensation. Ce phénomène peut être accentué par un raccord direct à un convecteur placé sous la fenêtre (Figure 5). De la même manière, les revêtements intérieurs de finition qui isolent efficacement la section intérieure du dormant de la chaleur de la pièce, abaissent la température du dormant et augmentent les risques de condensation.

Tableau de baie de la fenêtre

Les Figures 6 et 7 illustrent les problèmes et les caractéristiques des tableaux de baie en fonction des risques de condensation. Les fenêtres installées de l'extérieur, éloignées du revêtement intérieur de finition, ou séparées de l'espace intérieur par des tentures ajustées, peuvent recevoir une quantité insuffisante de chaleur. Les températures de surface peuvent être abaissées et les risques de condensation augmentés.

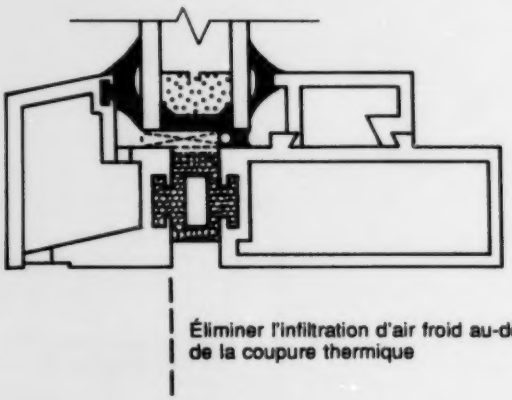


Figure 2. Coupure thermique dans le dormant.

Limites de tolérance des jonctions mur–fenêtre

Les concepteurs doivent tenir compte d'une variété de conditions de chargement des fenêtres en étant bien conscients de l'inexactitude des dimensions qui résulte des techniques de construction utilisées sur les chantiers. Les dimensions des ouvertures brutes peuvent différer des dessins de travail et sont souvent hors d'équerre. Il faut tenir compte des charges verticales qui pourraient être introduites par le fluage au cours des premières années suivant la construction. Les systèmes d'ancrage doivent transférer les surcharges dues au vent à la structure murale, tout en permettant la dilatation différentielle entre la fenêtre et le mur.

Transfert de charges autour des fenêtres

Les fenêtres sont conçues de façon à appuyer leur propre poids. Lorsque des charges verticales vers le bas sont transmises à la tête de dormant de la fenêtre, une flèche se produit et des charges peuvent être transférées aux dormants ou au vitrage. Ces transferts de charges vont influencer la facilité de manœuvre, ou peut-être exercer des contraintes sur les vitrages. Par conséquent, les charges verticales au-dessus de la tête de dormant de la fenêtre doivent être transmises au linteau ou autre élément de la charpente qui limite la flèche à un degré acceptable. Il faut tenir compte de la flèche lorsqu'on calcule la largeur du joint entre la tête de dormant de la fenêtre et le linteau.

Afin de limiter le transfert de charges verticales entre le linteau et la tête de dormant, le joint d'étanchéité dans la partie supérieure de la fenêtre doit pouvoir être comprimé en appliquant une faible force. On obtient ce résultat en utilisant un produit d'étanchéité ayant un faible module d'élasticité. Les points d'ancrage de la fenêtre devraient permettre le mouvement vertical de la tête de dormant, tout en réduisant au minimum la charge verticale transmise au dormant. Ce principe est illustré à la Figure 8.

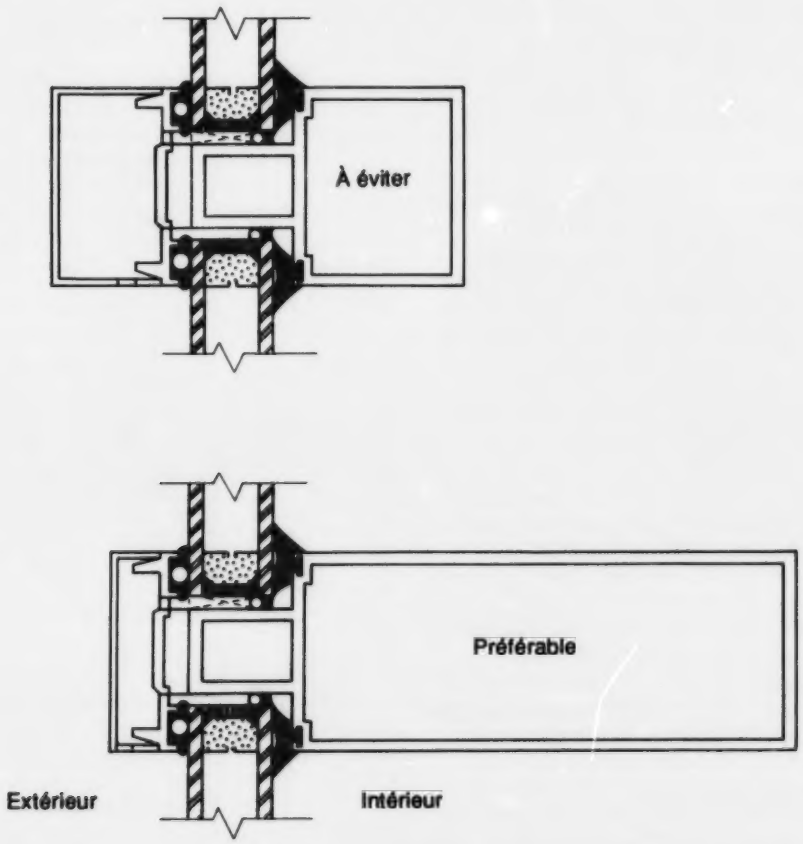


Figure 3. Augmentation de la surface du dormant exposée à la chaleur intérieure.

Appui des fenêtres

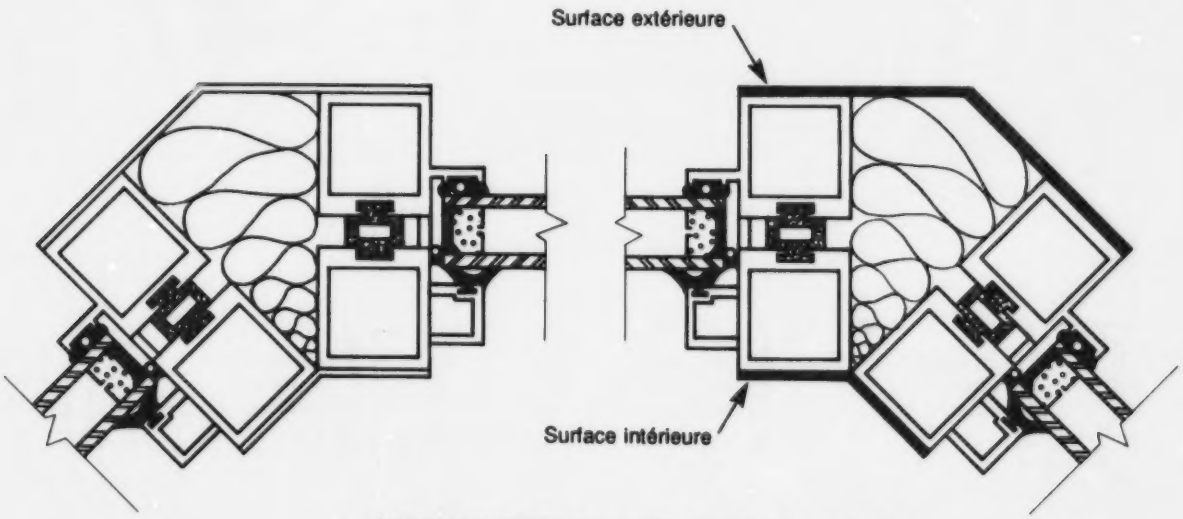
La partie inférieure du dormant ou du seuil de la fenêtre doit demeurer horizontale lorsque des charges verticales sont appliquées. Ces charges incluent la fenêtre elle-même et toutes les charges appliquées durant l'utilisation normale (par exemple, une personne appuyée sur le seuil de la fenêtre ou une personne qui pose le pied sur le seuil d'une porte-patio). Le nombre et l'emplacement des appuis sont choisis afin de minimiser la flèche du dormant ou du seuil de la fenêtre lorsque des charges sont appliquées.

Le matériau utilisé pour caler les dormants ou soutenir les vitrages doit avoir une dureté suffisante pour résister aux charges durant une période de temps indéfinie sans fluage, permettre l'ancrage et être un bon isolant thermique. La Figure 9 illustre comment des charges à l'intérieur d'une fenêtre sont transmises au mur de soutènement. Les éléments de charpente du mur de soutènement devraient également être en mesure d'assumer une partie de la charge.

Systèmes d'ancrage

Les systèmes d'ancrage des fenêtres doivent transmettre d'importantes surcharges dues au vent (positives ou négatives) au mur adjacent, résister aux déformations structurales comme le fluage, et permettre la dilatation thermique entre les matériaux. Comme les dimensions des fenêtres ont tendance à être plus grandes, la conception des systèmes d'ancrage devient de plus en plus importante.

Afin de limiter le déplacement des fenêtres en fonction du mur, plusieurs points d'ancrage sont nécessaires. La Figure 10 représente une grande fenêtre sur laquelle le point A est un point de référence, situé au milieu du seuil. Le point A empêche le mouvement dans toutes les directions, le point B ne permet que le déplacement vertical et les autres points transmettent la surcharge due au vent (Z) de manière à permettre le retrait ou la dilatation thermique.



- Lorsque les vitrages sont testés : surface ext. = surface int.
- Après combinaison :
- Surface ext. ≥ surface int.
- Les meneaux résistent moins bien à la condensation
- Le facteur RSI du meneau sera moins élevé

Figure 4. Effet de l'augmentation de la surface exposée du côté froid, fenêtre en baie.

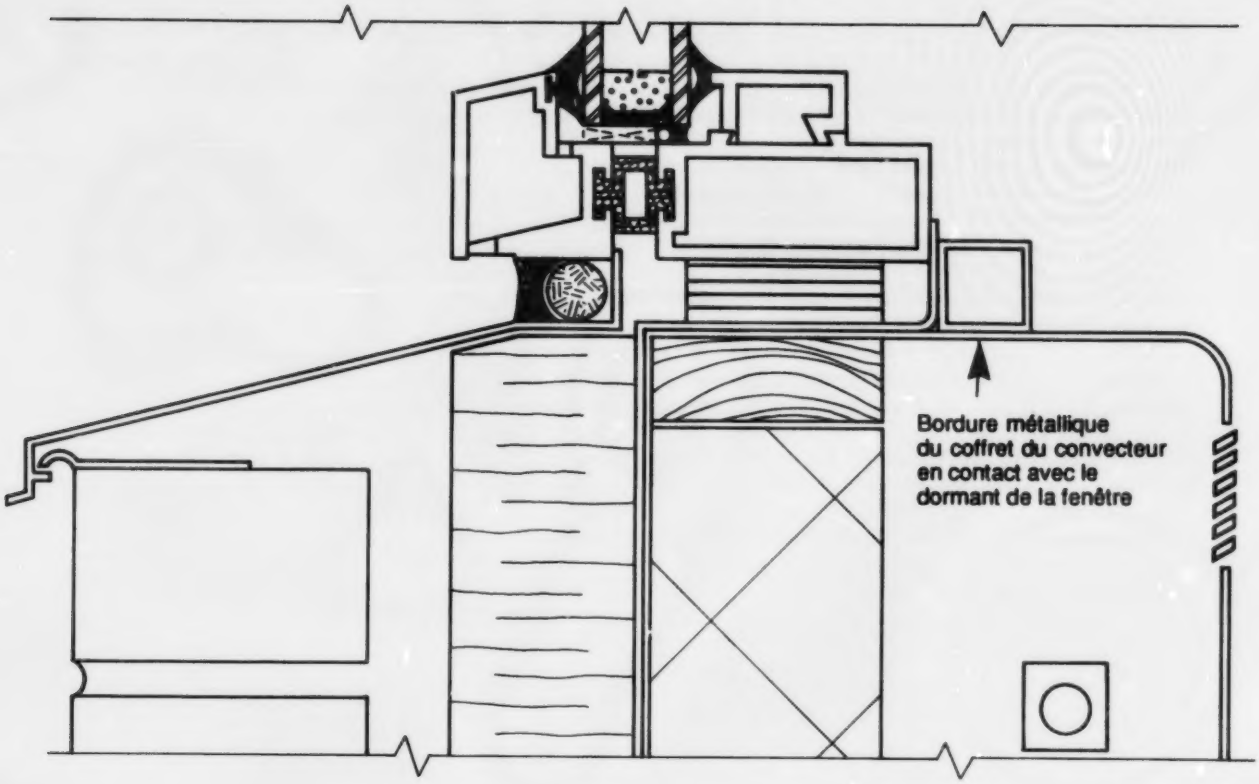


Figure 5. Augmentation de la surface intérieure de la bavure.

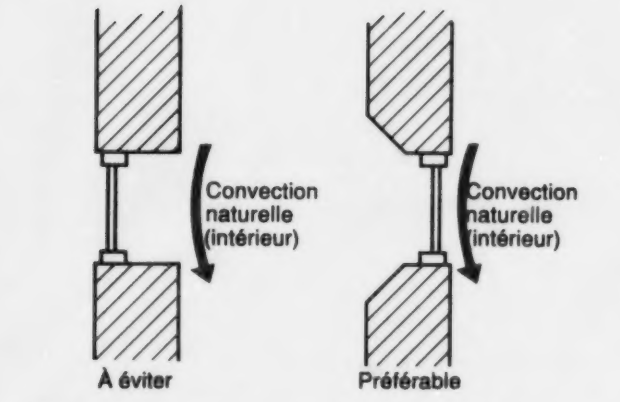


Figure 6. Effet de l'augmentation de la résistance du film intérieur de transfert de chaleur.

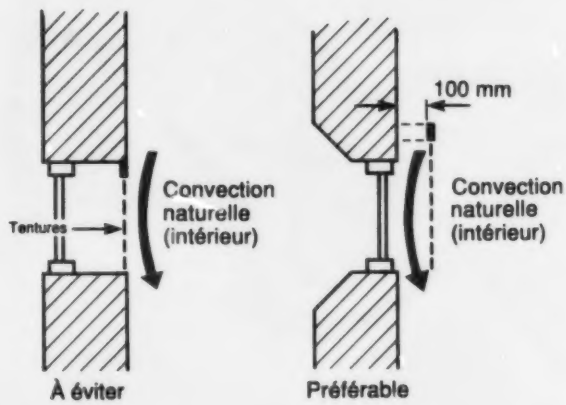


Figure 7. Limitation de la quantité de chaleur fournie à la fenêtre.

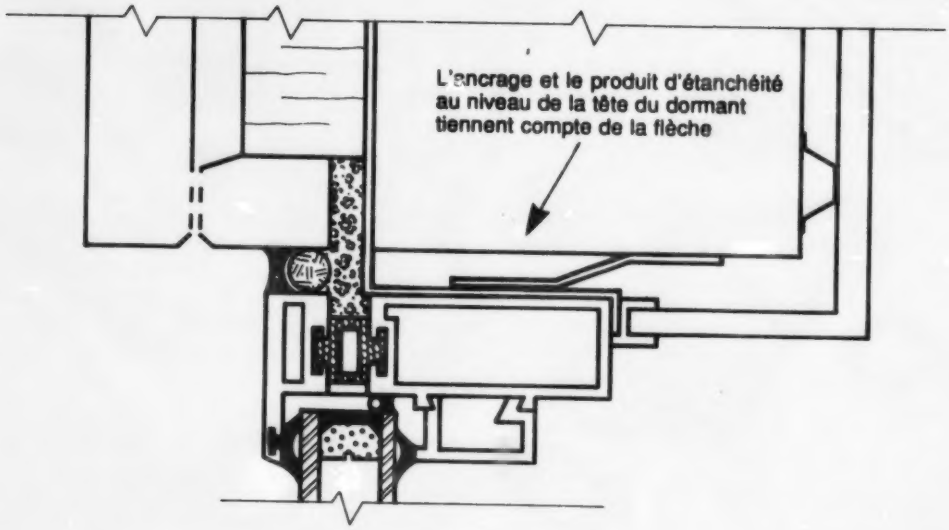


Figure 8. Ancrage au niveau de la tête de dormant.

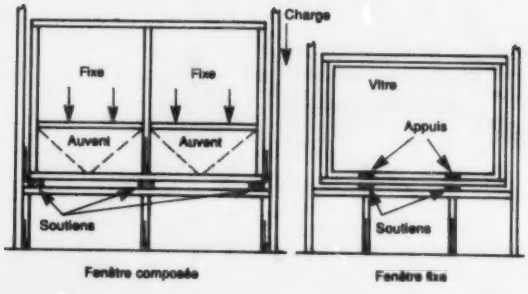


Figure 9. Appui des fenêtres.

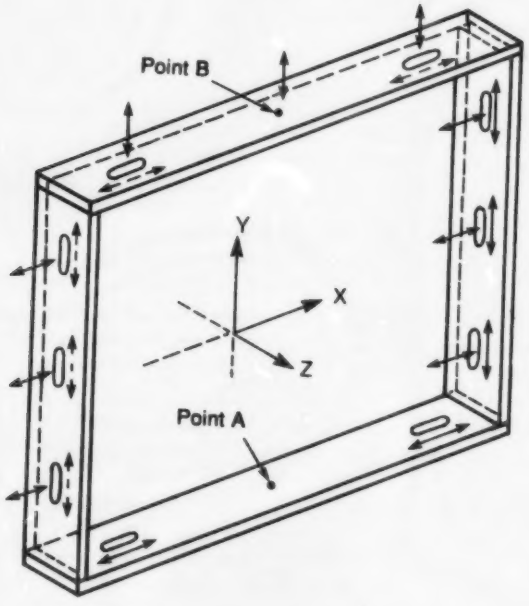


Figure 10. Les points d'ancrage et leurs degrés respectifs de liberté.

Dilatation thermique

Les matériaux se dilatent et rétrécissent à des vitesses différentes, selon que la température augmente ou baisse. Pour mesurer ce phénomène, on utilise le coefficient de dilatation thermique linéaire; il exprime la variation de longueur par unité de volume quand la température varie d'un degré. Les matériaux ayant des coefficients élevés, comme l'aluminium ou le PCV, doivent avoir des systèmes d'ancrage qui permettent le mouvement du joint, lorsqu'ils sont installés dans des murs de bois ou de brique (voir Tableau 1).

Tableau 1 Coefficient de dilatation linéaire

Matériau	Coefficient de dilatation linéaire (mm/mm/°C x 10^{-6})
Bois (avec grain)	3,8 à 6,5
Brique	5,6 à 6,3
Verre	9,2
Béton (gravier)	11,7
Acier de construction	12
Aluminium	23,2
PCV	80

La dilatation ou la contraction d'un matériau donné est le produit du coefficient, de la longueur et du changement de température du matériau. La formule peut s'écrire de la façon suivante :

$$\Delta L = \alpha \times L \times \Delta T$$

où : ΔL = dilatation (en mm),
α = coefficient de dilatation linéaire d'un matériau donné (mm/mm/°C $\times 10^{-6}$),
L = distance entre deux points d'ancrage sur le dormant (par exemple entre le point fixe A et le point d'ancrage suivant),
ΔT = variation de température prévue (°C).

Pour déterminer le mouvement du joint à n'importe quel point d'ancrage, il est nécessaire de posséder les données suivantes :

- différence de coefficient de dilatation entre le dormant (F) et le matériau d'ouverture (O) brute (α_F-α_O),
- distance entre le point d'ancrage A et le point d'ancrage étudié,
- variations de température auxquelles la fenêtre et le mur sont susceptibles d'être soumis au cours de la vie utile de la fenêtre. Les variations de température subies par la fenêtre peuvent être plus ou moins élevées que celles du mur, comme nous le verrons plus loin.

Le changement de la dilatation thermique du dormant par opposition à l'ouverture (F–O) peut se calculer ainsi :

$$\Delta L_{F\text{-}O} = [(\alpha_F \bullet \Delta T_F) - (\alpha_O \bullet \Delta T_O)]\, L$$

Les températures de surface varient selon la température ambiante, le rayonnement solaire et la masse thermique du bâtiment extérieur.[1] Ainsi, un mur de brique sera soumis à des variations de température moindres qu'un dormant de fenêtre en aluminium.

Par exemple, la Figure 11 illustre une fenêtre installée dans un mur de brique. La fenêtre peut être soumise à des écarts de température de 100 °C et la brique à des écarts de 80 °C. Les mouvements du joint se rapportant au point A et concernant différents matériaux de dormant sont présentés au Tableau 2.

Tableau 2 Mouvement du joint (mm)

Point	Fenêtre en aluminium		Fenêtre en PCV		Fenêtre en bois	
	X	Y	X	Y	X	Y
B	1,58[1]	0	6,7	0	-0,16[3]	0
C	1,58	2,11[2]	6,7	8,93	-0,16	-0,22
D	0	2,11	0	8,93	0	-0,22

[1] *Les résultats positifs indiquent que le produit d'étanchéité est soumis à une compression (points B et D) ou à un mélange de compression et de cisaillement (point C).*
[2] *Le mouvement total du joint dans les directions X et Y au point C par opposition au point A est de 2,64 mm.*
[3] *Les résultats négatifs indiquent que le produit d'étanchéité est soumis à une traction (point B ou D) ou à un mélange de traction et de cisaillement (point C).*

Les équipes d'installation doivent tenir compte de la température ambiante au moment de la pose afin de déterminer si le matériau du dormant de la fenêtre est susceptible de s'allonger davantage avec l'augmentation de la température, ou de rétrécir. Cela influera

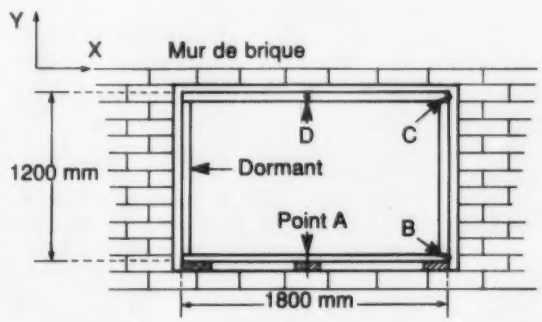


Figure 11. Dilatation et contraction à la jonction mur–fenêtre.

évidemment sur l'emplacement du dispositif de fixation dans la fente.

Conception des joints

La conception des joints doit tenir compte non seulement du mouvement différentiel entre les matériaux, mais également des différentes sections du dormant, des contraintes d'installation et des conditions de service. Dans bien des cas, le produit d'étanchéité est exposé aux conditions extérieures, c'est-à-dire à des températures extrêmes, au rayonnement solaire, à la pluie, à la neige et à la glace. De nombreux types de joints sont utilisés à la jonction mur–fenêtre mais, dans la plupart des cas, il s'agit de joints bout à bout, de joints à recouvrement ou d'une combinaison des deux, par exemple des joints de pourtour. Il faut également prendre en considération les propriétés du produit d'étanchéité. L'utilisation d'un matériau de remplissage ou d'un support anti-adhérent ne doit pas être négligée. La conception efficace des joints et une bonne sélection des produits d'étanchéité réduisent les frais d'installation et les fréquences d'entretien.[2]

Joints bout à bout

Les joints bout à bout imposent habituellement des contraintes de traction et de compression au produit d'étanchéité. Les concepteurs devraient :

- Établir la largeur des joints en tenant compte de la capacité de mouvement du produit d'étanchéité choisi (par exemple, lorsque le mouvement est de ±3 mm et que la résistance au mouvement du produit d'étanchéité est de ±25 pour 100, le joint doit avoir une largeur minimum de 12 mm).
- Suivre les instructions du fabricant concernant l'épaisseur minimum et maximum du produit d'étanchéité. Règle générale, le rapport de la largeur du joint à la profondeur du produit d'étanchéité est d'environ 2 à 1. Un mince cordon de produit d'étanchéité (3 à 12 mm) résiste davantage au mouvement du joint en réduisant la contrainte imposée à la ligne d'adhérence du produit d'étanchéité (voir Figure 12). La contrainte (et la flèche qui en résulte) exercée sur les membres reliés est diminuée, ce qui peut entraîner une réduction des coûts.
- Utiliser un matériau de remplissage afin que le produit d'étanchéité ait une bonne configuration et pour empêcher qu'il y ait une adhérence sur trois côtés. La bonne configuration de la coupe transversale du produit d'étanchéité est la même que celle d'un biconcave (Figure 12). Cela réduit la concentration des contraintes aux angles du cordon. Les matériaux recommandés pour les joints profonds sont la mousse de polyéthylène cellulaire (qui ne dégage pas de gaz), la mousse de polyuréthane et les tiges ou tubes de néoprène. Le ruban de polyéthylène est souvent recommandé dans le cas des joints dont la profondeur ne permet pas l'installation d'une tige de mousse. Les propriétés des produits d'étanchéité et

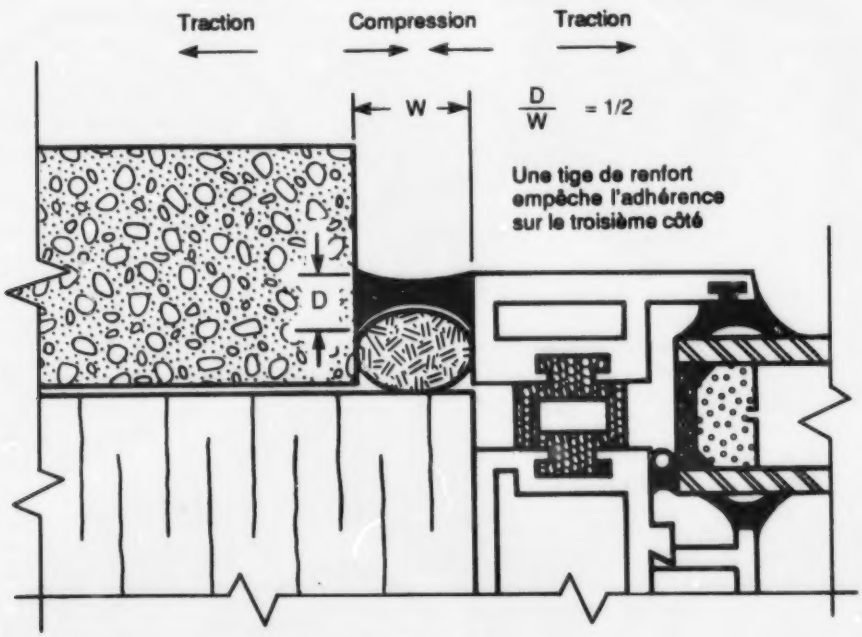


Figure 12. Configuration d'un joint bout à bout.

des anti-adhérents doivent être compatibles avec celles des matériaux.

Joints à recouvrement

Les joints à recouvrement comme ceux sous les seuils de fenêtre soumettent principalement les produits d'étanchéité à des contraintes de cisaillement. Les concepteurs devraient :

- Prévoir des rapports profondeur–largeur qui tiennent compte des spécifications des fabricants de produits d'étanchéité (normalement entre 1 à 1 et 1 à 3);
- S'assurer que le matériau de remplissage est compatible avec le produit d'étanchéité, et qu'il permet l'adhérence aux deux surfaces du joint tout en isolant la troisième (Figure 13).

Joints de pourtour

Normalement, les joints entre le dormant de la fenêtre et l'ouverture brute doivent avoir la même performance que les joints bout à bout et les joints à recouvrement, c'est-à-dire résister dans une certaine mesure à la compression, à la traction et au cisaillement (Figure 14). Des pratiques de conception prudentes qui ne nécessitent qu'une partie de la capacité de mouvement des produits d'étanchéité sont recommandées.

Sélection des produits d'étanchéité appropriés

Les produits d'étanchéité constituent une barrière qui s'oppose au passage de l'eau, de l'air, du bruit et de la poussière. Parmi les nombreuses propriétés à examiner au moment de la sélection, la plus importante est la capacité du produit d'étanchéité à absorber le mouvement d'une manière élastique (c'est-à-dire que le produit d'étanchéité ne doit pas subir de déformation permanente).

Après que le concepteur s'est assuré que le produit d'étanchéité possède des caractéristiques de mouvement adéquates, d'autres propriétés comme l'adhérence, la cohésion, la dureté, le module d'élasticité, la déformation rémanente après compression et la résistance aux intempéries interviennent dans le choix du produit.

Dans le cas des produits d'étanchéité à haute performance, une *bonne adhérence* aux surfaces adjacentes exige que celles-ci soient enduites d'une couche d'impression.[4] La *cohésion* est la capacité du matériau à maintenir sa stabilité. Cet aspect est relié au *module*, qui à son tour relie la contrainte à la déformation à l'intérieur du produit d'étanchéité. La force d'adhésion et le module doivent être équilibrés. Un produit d'étanchéité très adhérent mais possédant un faible module d'élasticité fera défaut au niveau de la cohésion. En revanche, une défaillance au niveau de l'adhésion peut se produire si la cohésion est trop élevée.

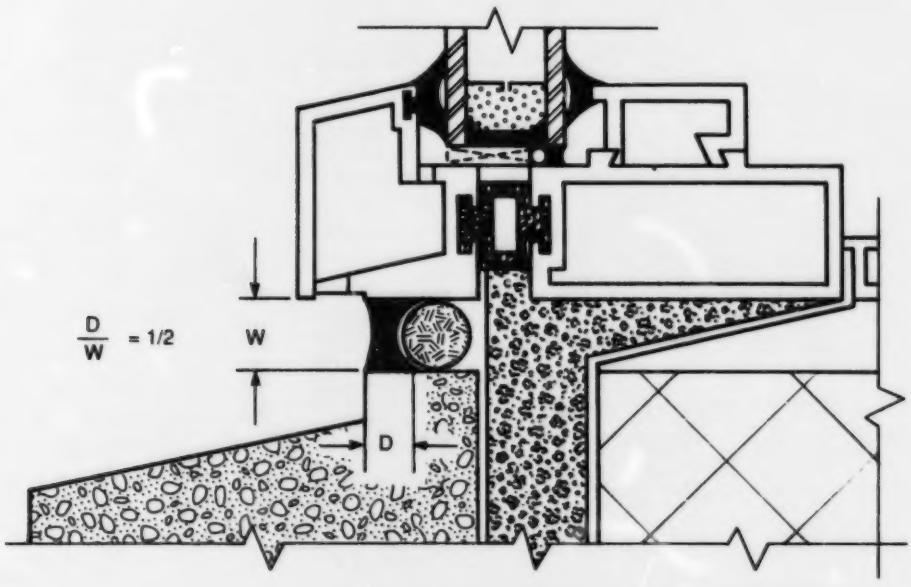


Figure 13. Détail d'un joint à recouvrement type.

La *déformation rémanente après compression* mesure la tendance du produit d'étanchéité à demeurer comprimé après chargement et peut influer sur sa capacité d'absorber ultérieurement les efforts de traction.

La *résistance aux intempéries* dépend du type d'exposition auquel le produit est soumis. Cela inclut les fluctuations de température et d'humidité, l'exposition aux ultraviolets, les fluctuations de pression produites par le vent, et les polluants atmosphériques. Une exposition trop violente peut raccourcir la durée de vie du produit et diminuer sa capacité de résister au mouvement du joint.

Évaluation de la conception du joint en fonction d'un produit d'étanchéité

La largeur du joint est calculée en divisant le mouvement prévu du joint par la capacité de mouvement du produit d'étanchéité. Par exemple, examinons le joint qui entoure la fenêtre en aluminium du Tableau 2. La fenêtre est installée dans un mur de brique et le Tableau 2 indique le mouvement prévu du joint. Les largeurs de joints suivantes seraient nécessaires si la capacité de mouvement du joint était de ±10 pour 100 :

a) Joints bout à bout :
   Mouvement maximum du joint = 2,11 mm
   (Tableau 2, point C)
   Largeur de joint requise = 2,11 × 100/10 = 21,1 mm
   Si le rapport de la largeur du joint à sa profondeur est de 2 à 1, la profondeur du joint = 10 mm.
b) Joints à recouvrement :
   Mouvement maximum du joint = 2,11 mm
   (Tableau 2, point C)
   Largeur de joint requise ≥ 2 × mouvement maximum du joint = 2 × 2,11 mm = 4,22 mm.

À titre de comparaison, le Tableau 3 indique la largeur et la profondeur du joint selon diverses caractéristiques du produit d'étanchéité, dans le cas de dormants en bois et en PCV installés dans une ouverture de maçonnerie. Il ressort que seuls les produits d'étanchéité dotés d'une haute résistance au mouvement devraient être utilisés avec le dormant en PCV, alors que les produits d'étanchéité avec résistance au mouvement plus faible conviennent très bien à la fenêtre en bois.

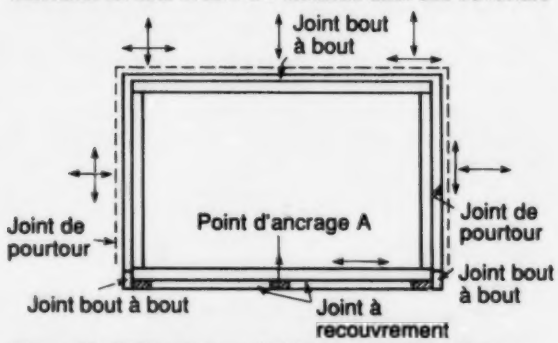


Figure 14. Différents types de joints en périphérie d'une fenêtre.

Essai d'un prototype

Une fenêtre est un système complexe de composants ayant des exigences de performance sévères. Il n'est pas toujours possible de prédire avec précision la performance globale à partir de principes de conception, ou de prévoir tous les problèmes d'interface entre la fenêtre et les éléments muraux. L'incertitude au niveau de la performance de la fenêtre peut être atténuée en soumettant à des essais un prototype ou une maquette de la fenêtre et du système mural. Cela diffère complètement de la réalisation d'essais types à l'aide d'un échantillon de fenêtre.

Voici quelques exemples pour lesquels l'essai d'une maquette en laboratoire peut être envisagé :

- si les exigences de conception ou la combinaison des matériaux sont inhabituelles,
- si l'interaction du système de CVC est importante, par exemple si la condensation de surface est susceptible d'être un problème et que ce système est conçu pour fournir à la fenêtre une chaleur plus grande que la normale (Figure 15),
- s'il y a des problèmes en ce qui concerne la performance du système, au niveau de la condensation, par exemple dans les musées ou dans les lieux conçus pour un équipement électrique nécessitant un taux d'humidité relative élevé,
- si des détails spéciaux sont conçus pour assurer la continuité au niveau du pare-air et de l'écran pare-pluie.

Voici quelques exemples pour lesquels des maquettes in situ peuvent être envisagées :

- si le même détail revient de nombreuses fois, par exemple dans le cas d'un immeuble en hauteur pour lequel des modifications après achèvement seraient coûteuses,
- s'il s'avère nécessaire d'indiquer la performance réelle des produits à utiliser,
- si des problèmes particuliers se posent sur les lieux, par exemple au niveau des étapes des travaux, des tolérances de construction ou du caractère pratique,
- s'il y a des éléments du système qui sont critiques et qu'il est nécessaire de montrer à l'équipe de construction les conséquences qu'entraînerait le non-respect de certaines spécifications,

Tableau 3 Solutions concernant la configuration des joints

Résistance au mouvement du produit d'étanchéité (%)	Dormant en PCV		Dormant en bois	
	Largeur du joint (mm)	Profondeur du joint (mm)	Largeur du joint (mm)	Profondeur du joint (mm)
10	9	12	6	3
20	45	12	6	3
30	30	12	6	3
40	22	11	6	3

- si l'on doit prouver, en vertu d'une clause de la soumission, que les spécifications sont respectées.

Le moment le plus favorable pour effectuer l'essai des maquettes varie selon l'objectif. Si l'essai a pour but d'évaluer la conception, il doit être fait avant que les soumissions soient finalisées, afin que l'on puisse intégrer les résultats au devis. Cela s'applique particulièrement si l'on prévoit que les fabricants auront peut-être à modifier leurs stocks afin de répondre aux besoins du bâtiment. Les essais lors de la conception peuvent être suivis d'un essai du produit fini sélectionné.

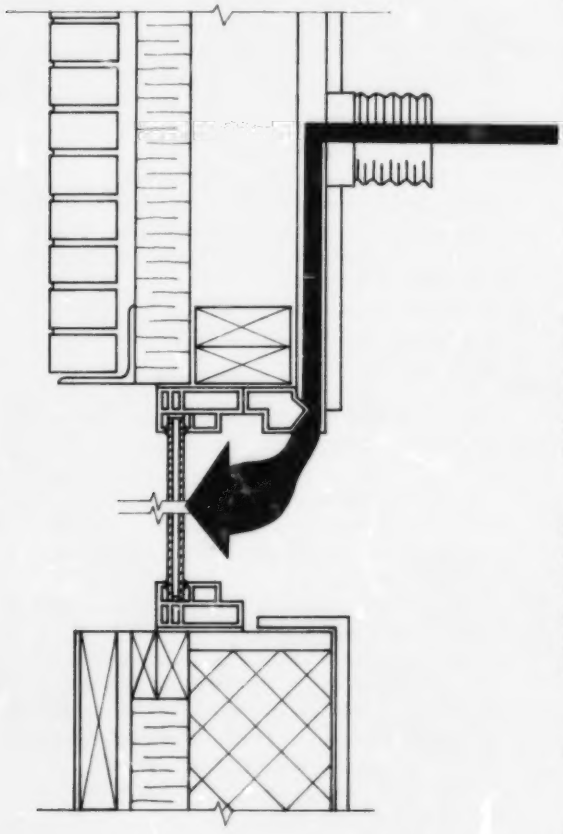


Figure 15. Interaction entre le système mur–fenêtre et le CVC.

Si l'on doit avoir recours aux essais in situ, on doit les commencer au cours de la première étape du projet et, si besoin est, les reprendre aux étapes suivantes. Le nombre d'essais par maquette dépend du degré de certitude nécessaire quant à la performance finale, et des conséquences d'une défaillance.[5]

Les essais réels à effectuer varient selon les aspects critiques de la conception. Il existe quatre essais courants qui seront probablement envisagés :

- performance de la maquette soumise à différentes températures de surface,
- infiltration d'air,
- fuite d'eau, et
- force requise pour la manœuvre.

Dans le cas des essais de maquettes in situ, les trois derniers sont les plus courants.

Il est nécessaire, pour effectuer les essais, de choisir un laboratoire indépendant ou un groupe d'experts. Il est également bon que les essais soient exécutés sous l'étroite surveillance du concepteur du bâtiment. Les laboratoires accrédités par le Conseil canadien des normes sont à considérer, car ils assurent un certain niveau de compétence et de responsabilité.

Les essais des maquettes ne doivent pas être faits au hasard. Les travaux sont coûteux et, s'ils ne sont pas effectués correctement, peuvent produire des résultats erronés. En revanche, s'ils sont bien exécutés, ils donnent des informations extrêmement utiles qui permettront d'améliorer la performance à long terme du système.

Conclusion

Une bonne intégration de la fenêtre au reste de l'enveloppe du bâtiment exige une compréhension de la

science du bâtiment et de la capacité des ouvriers à réaliser les travaux de façon efficace. Si les concepteurs prennent l'initiative de spécifier la façon dont la jonction mur–fenêtre doit être construite, il est fort probable que le système qui en résultera dépassera les performances d'un système conçu sur place.

Références

1. G.O. Handegord et K.K. Karpati, *Le mouvement des joints et le choix du matériau de calfeutrement*, Division des recherches en bâtiment, Conseil national de recherches du Canada, Digest de la construction au Canada n° 155F, 1973.
2. G.K. Garden, *Emploi des matériaux de calfeutrement*, Division des recherches en bâtiment, Conseil national de recherches du Canada, Digest de la construction au Canada n° 96F, 1967.
3. *Performance des matériaux en service*, Compte rendu du Regard 84 : Science du bâtiment, Institut de recherche en construction, Conseil national de recherches du Canada, CNRC 24968F, 1986.
4. R. Baldwin, *Selecting high performance building sealants*, Entretien et réparations techniques, janvier 1976, p. 58–64.
5. *Introduction to sampling procedures for materials and manufactured products*, Association canadienne de normalisation, Z90–1975.

Technologie de pointe dans l'industrie de la fenêtre

A.H. Elmahdy et S.M. Cornick

Introduction

L'industrie de la fenêtre survit et se développe grâce à des découvertes dans divers domaines, en particulier dans la conception et la fabrication des fenêtres. La définition de technologie «nouvelle» est arbitraire; le présent exposé traite des développements survenus dans l'industrie de la fenêtre à la suite de perfectionnements au niveau de la physique et de l'ingénierie. Bon nombre de ces perfectionnements ont une incidence sur la résistance thermique, sur la température de surface, sur les caractéristiques de transmission du rayonnement solaire et sur le comportement structural des fenêtres.

Puisque les fenêtres jouent un rôle important dans l'enveloppe du bâtiment, des efforts considérables ont été déployés afin d'améliorer leur conception et leur efficacité. Au début des années soixante-dix, l'intérêt pour les économies d'énergie et pour le confort a mené à de nombreuses améliorations de la conception des fenêtres et des matériaux utilisés pour leur fabrication. De plus, le coût élevé des rénovations aux bâtiments a accru la demande de fenêtres de haute qualité sous différents aspects : performance thermique, installation, utilisation, résistance au feu et entretien.

Le présent exposé résume les plus récents développements technologiques dans l'industrie de la fenêtre.

Vitrages

Une fenêtre à double vitrage type perd de la chaleur de trois façons : par convection, par conduction et par rayonnement. Le rayonnement est responsable des 2/3 des déperditions calorifiques, le reste étant imputable à la conduction et à la convection.[1] L'un des moyens utilisés pour améliorer la performance thermique des fenêtres est de limiter les pertes par rayonnement thermique. L'utilisation de films translucides diminue la quantité de chaleur transmise par conduction et par rayonnement. Les déperditions calorifiques dues à la convection peuvent être réduites grâce à l'utilisation de gaz autres que l'air. La résistance thermique peut aussi être augmentée par l'usage de techniques assez ésotériques comme les aérogels et les vitrages sous vide.

Vitrages à faible émissivité

Les premiers vitrages à faible émissivité sont apparus vers la fin des années soixante et au début de la décennie suivante.[2] Une technique de pulvérisation cathodique discontinue a été utilisée aux États-Unis pour déposer des enduits d'oxyde d'indium sur du verre. Des enduits conducteurs d'électricité de ce type ont été utilisés pour chauffer le verre et améliorer sa transparence.[3] Des perfectionnements aux films, aux enduits et aux méthodes de production ont permis d'améliorer la qualité et de réduire le coût des vitrages à faible émissivité. En 1985, les vitrages à faible émissivité occupaient 5 pour 100 du marché de la construction résidentielle.[4] On prévoit qu'en 1988 leur part aura passé à 25 pour 100.[5]

L'application de minces films ou d'enduits de métaux ou de matériaux semi-conducteurs peut modifier la transmittance, la réflectivité et l'absorptivité d'une surface.[6] Ces films peuvent être conçus pour absorber ou réfléchir différentes plages de longueurs d'ondes. On peut réaliser un profil réflectivité–transmittance correspondant aux caractéristiques désirées. Une fenêtre de type résidentiel devant être exposée à un climat froid, par exemple, devrait laisser passer la lumière visible et le rayonnement à ondes courtes du soleil, mais réfléchir le rayonnement à longue longueur d'onde émis par le contenu des pièces (Figure 1). Dans les établissements

commerciaux, où la charge de refroidissement est la plus importante, le rayonnement solaire à ondes courtes (infrarouge proche) devrait être réfléchi à l'extérieur pour réduire au minimum les gains de chaleur solaire. Des profils de réflectivité et de transmittance idéaux pour les bâtiments résidentiels et commerciaux sont donnés à la Figure 2.

Enduits à faible émissivité

Les enduits à faible émissivité sont constitués de fines couches de métaux purs ou de semi-conducteurs. Les enduits sont rendus sélectifs par un dopage afin de leur donner la transmittance désirée.[6,7] Ces enduits sont soit durs, soit mous. Ils peuvent aussi être appliqués sur un mince film plastique incorporé à la fenêtre.

Un *enduit mou* est généralement constitué d'une mince couche de métal pur déposée sur le verre. L'application se fait par pulvérisation cathodique. L'étain, l'argent, l'or, l'indium et le cuivre sont des exemples de métaux utilisés comme enduits mous. À l'exception de l'or, ces métaux s'oxydent facilement; ils ne doivent donc être utilisés que dans les vitrages isolants afin de protéger les enduits.

Les enduits sont constitués d'une couche de métal et d'un enduit protecteur (Ag–TiO_2, par exemple) ou d'une couche de métal, d'un enduit de séparation et d'un enduit protecteur (TiO_2–Ag–TiO_2, par exemple). Des émissivités se situant entre 0,05 et 0,1 peuvent être réalisées grâce aux enduits mous. Cela se traduit par une résistance thermique d'environ RSI 0,55 pour une fenêtre à double vitrage avec enduit sur la vitre extérieure, en comparaison d'une résistance de RSI 0,31 pour une fenêtre à double vitrage ordinaire. Le Tableau 1 donne les résistances thermiques de différentes configurations de fenêtres.[8,9]

Tableau 1 Résistance thermique de différents systèmes de vitrage

Fenêtre	Résistance thermique (RSI)
Double vitrage, verre clair	0,31
Double vitrage, enduit mou	0,53
Double vitrage, enduit dur	0,47
Triple vitrage, enduit à faible émissivité sur mince film	0,56

Les désavantages des enduits mous sont la fragilité de l'enduit et la possibilité d'oxydation des métaux. L'enduit est fragile et les vitres doivent être manipulées avec des gants. L'enduit est également sensible à l'humidité.

Il est à noter qu'il n'existe pas de norme ni d'essai permettant d'évaluer la durabilité à long terme de ces enduits.

L'enduit dur est obtenu par pulvérisation d'un matériau semi-conducteur, comme l'oxyde d'étain

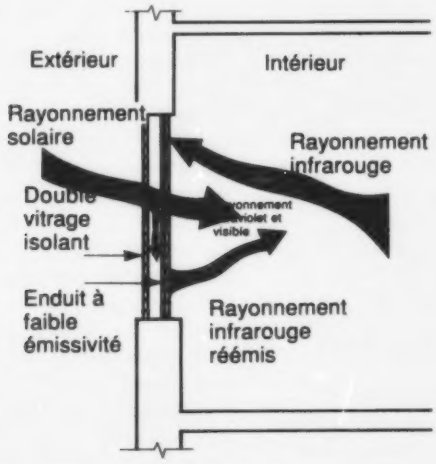


Figure 1. Un enduit à faible émissivité appliqué sur le verre réduit la perte de chaleur par rayonnement.

(SnO_2), sur le verre chaud sortant de la flottaison. L'enduit est cuit sur le verre à mesure que ce dernier refroidit et forme une couche dure et durable. Le verre ainsi revêtu peut être manipulé et coupé comme du verre ordinaire. Malheureusement, il faut sacrifier un peu de rendement thermique pour obtenir cette durabilité accrue et cette plus grande facilité de manipulation.
L'émissivité du verre ainsi revêtu se situe entre 0,35 et 0,5. Une émissivité de seulement 0,2 a été atteinte en laboratoire,[10] mais la transparence et l'esthétique du verre laissaient à désirer. La résistance thermique des fenêtres à double vitrage avec enduit dur se situe aux environs de RSI 0,47.

Des *films suspendus et appliqués* peuvent être utilisés pour réduire l'émissivité du vitrage. Les films suspendus sont généralement de minces pellicules de polyester ou de mylar sur lesquelles on a déposé sous vide une couche d'oxyde de métal. Cette technique est semblable à celle de l'enduit mou et, comme ce dernier, le film suspendu doit être utilisé dans un vitrage isolant. Les films suspendus doivent être maintenus constamment sous tension pour éviter que des plis s'y forment, ce qui nuirait aux caractéristiques optiques du vitrage. En raison des différents coefficients de dilatation des matériaux, il faut mettre un soin particulier à maintenir une tension constante. Ces films sont généralement montés dans leur propre dormant ou entre deux intercalaires à l'intérieur des vitrages isolants. La résistance thermique de ce type de fenêtre se situe aux environs de RSI 0,56.

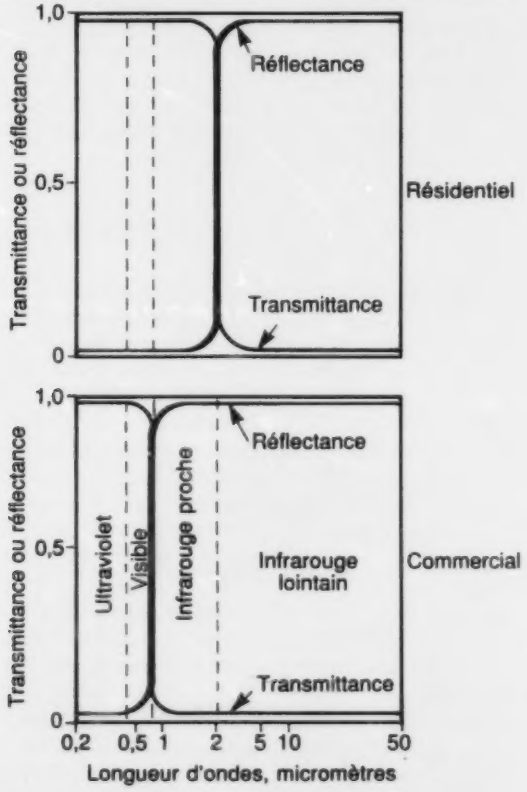


Figure 2. Réponse spectrale idéale d'enduits à faible émissivité pour les utilisations résidentielles et commerciales.

Position de l'enduit

Les enduits à faible émissivité peuvent être installés en différents endroits de la fenêtre. De par leur nature, les enduits mous ne peuvent être placés que dans l'espace entre les deux vitres d'un vitrage isolant. Si l'on numérotait de un à quatre (Figure 3) les surfaces d'une fenêtre à double vitrage (de l'extérieur vers l'intérieur), les enduits mous ne pourraient être placés que sur l'une ou l'autre des surfaces 2 et 3. Dans une région au climat froid, où il faut réduire au minimum les pertes de chaleur, l'enduit devrait être sur la surface 3. Dans un milieu où le refroidissement est le plus important et où les gains de chaleur solaire doivent être réduits, la surface 2 conviendrait mieux. La même règle s'applique aux enduits durs. Il faut éviter de revêtir la surface 4, c'est-à-dire la face intérieure : en hiver, cette surface serait plus froide que la normale en raison de la chaleur réfléchie, ce qui augmenterait les risques de condensation.

Vitrage isolant empli de gaz

Comme il a été mentionné précédemment, l'utilisation d'un gaz lourd ou d'un mélange de gaz pour emplir la cavité entre les vitres peut améliorer les caractéristiques thermiques d'un vitrage isolant en réduisant le transfert thermique par convection et par conduction. Le choix des gaz appropriés dépend de nombreux facteurs, notamment de leurs propriétés physico-chimiques et leur compatibilité avec les autres matériaux à l'intérieur de la fenêtre. Seuls quelques gaz ont les caractéristiques nécessaires pour remplir les conditions pratiques suivantes :[11]

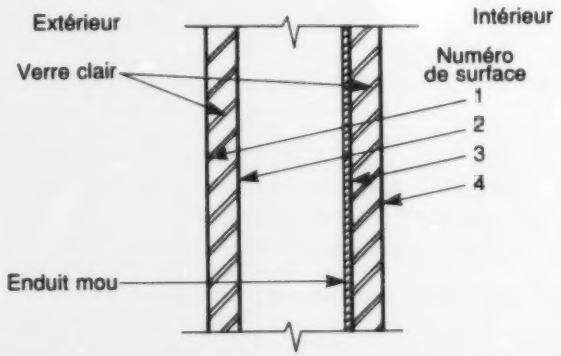


Figure 3. Enduit mou appliqué sur la surface 3 d'un double vitrage isolant.

- ne se décompose pas si exposé à la lumière solaire et au rayonnement ultraviolet,
- ne réagit pas chimiquement avec le verre, avec le produit d'étanchéité ni avec le dormant de la fenêtre,
- est non toxique et non dommageable pour l'environnement,
- ne se diffuse pas facilement à travers les produits d'étanchéité de la fenêtre,
- ne se condense pas entre les vitres de la fenêtre à des températures très froides,
- est facilement disponible et relativement peu coûteux.

Remplissage au gaz et variations de la résistance thermique

La modélisation de fenêtres emplies de gaz indique que la résistance thermique varie en raison de la présence d'un gaz lourd dans la cavité.[12] Les variations dépendent du type de gaz utilisé et de l'efficacité de la méthode de remplissage.

En général, les fenêtres emplies de gaz ont également un enduit à faible émissivité. L'effet combiné du gaz et de l'enduit sur la résistance thermique est illustré aux Figures 4 et 5. La présence d'un enduit à faible émissivité sur la surface 2 réduit la perte de chaleur par rayonnement à travers le vitrage. De plus, la température du gaz dans la cavité est plus basse, ce qui réduit l'effet nuisible des courants de convection dans la cavité. Ces facteurs combinés réduisent le coefficient global de transfert thermique à travers le vitrage, augmentant du même coup la résistance thermique de la fenêtre.

Remplissage au gaz et absorption acoustique

En plus d'accroître le rendement thermique des vitrages isolants, le remplissage au gaz peut aussi en améliorer légèrement les caractéristiques de transmission acoustique. Certains mélanges de gaz ont une meilleure absorption acoustique que l'air. On dispose de peu de données sur l'indice de transmission du son (ITS) des fenêtres emplies de gaz; une étude estime, toutefois, que l'ITS serait augmenté de 3 à 5 points grâce au gaz.[13]

Limites de la technologie et des applications

Les vitrages isolants emplis de gaz sont sujets à un certain nombre de problèmes. Une fois que la fenêtre est emplie de gaz et fermée hermétiquement, on présume que le gaz demeurera dans la cavité. Malheureusement, une quantité importante de gaz est diffusée à travers le produit d'étanchéité au cours de la durée de vie utile de la fenêtre.[14] Ce phénomène peut causer une augmentation de la pression de gaz dans la cavité (ce qui peut provoquer un bombement du verre) ou une diminution de pression (qui peut produire une concavité du verre).

Par conséquent, bien que les fenêtres emplies de gaz offrent une meilleure performance thermique que les fenêtres comparables contenant de l'air, l'acheteur doit être conscient de la dégradation à long terme (et parfois prématurée) de la performance globale de ces fenêtres. Si l'acheteur décide d'utiliser des fenêtres contenant du gaz, ces aspects devraient être considérés.

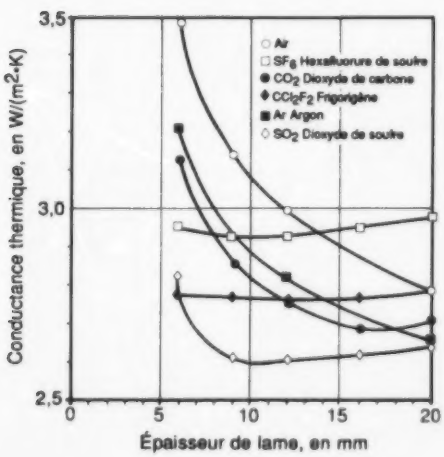


Figure 4. Résistance thermique globale du vitrage isolant clair sans enduit, empli de gaz.

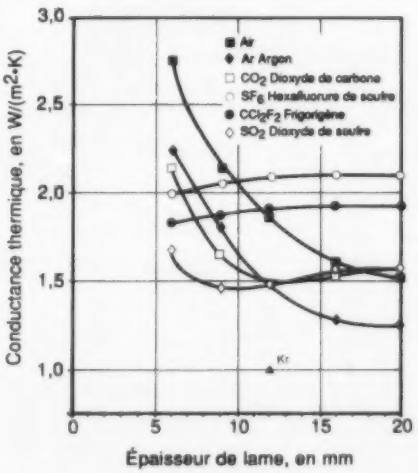


Figure 5. Résistance thermique globale du vitrage isolant avec enduit, empli de gaz.

Vitrages d'avant-garde

Les innovations décrites précédemment sont dès perfectionnements technologiques récents. La présente section analysera la technologie d'avant-garde (aérogels, vitrages à adaptation et vitrages sous vide). La plupart de ces produits n'en sont encore qu'au stade expérimental, mais quelques-uns sont déjà sur le marché.

Aérogels

Les aérogels sont parfois décrits comme des isolants translucides. Les aérogels de silice sont constitués d'un réseau réticulé de grains de silicone plus petits que la longueur d'onde de la lumière visible. Le diamètre de ces particules se situe typiquement entre 0,005 μ m et 0,01 μ m.[15,16] Les aérogels peuvent avoir une conductivité thermique supérieure à l'air emprisonné parce qu'ils contiennent jusqu'à 97 pour 100 d'air par volume dans des pores plus petits que le libre parcours moyen des molécules d'air. La résistance thermique d'une épaisseur de 25 mm d'aérogel se situe entre RSI 0,88 et RSI 1,23.[17]

Les propriétés physiques des aérogels sont principalement le résultat de leur faible densité. Ils sont très poreux et beaucoup plus faibles que le matériau de base à partir duquel ils sont formés; ils doivent donc être renforcés pour être utilisés comme vitrage.[18]

Vitrages à adaptation

La recherche dans le secteur des vitrages à adaptation porte sur leurs caractéristiques optiques et fonctionnelles ainsi que sur l'amélioration de leur performance thermique. Dans un vitrage à adaptation, les propriétés optiques subissent des modifications qui sont réversibles. L'une des propriétés les plus utiles et les plus facilement exploitables est le phénomène chromogène, qui fait que les matériaux modifient leur réflectivité et leur absorptivité. Les procédés thermochrome, électrochrome et photochrome sont des exemples de procédés chromogènes.

Les propriétés optiques des *vitrages thermochromes* varient en réaction aux changements de température. Ils sont principalement constitués de liquides ou de gels pris entre deux vitres. Les fenêtres thermochromes sont conçues pour faire obstacle au gain de chaleur solaire. L'un des inconvénients de ces systèmes est qu'ils réduisent la transmission de la lumière visible. Il y a aussi un risque de fuite du liquide thermochrome hors du vitrage, ce qui affecterait la stabilité à long terme de ces matériaux.

Les propriétés optiques d'un *vitrage électrochrome* varient lorsqu'un courant électrique le traverse. On obtient ce type de vitrage en déposant un mince film métallique sur le verre selon un procédé semblable à celui des vitrages à faible émissivité. Une autre méthode consiste à prendre en sandwich un film de quartz liquide entre deux vitres.

Les *matériaux photochromes* réagissent à la lumière. Les lunettes de soleil photosensibles en sont l'exemple le plus courant. Lorsque la transmittance des matériaux photochromes est changée, leur absorptivité augmente et ils absorbent donc plus de chaleur. Pendant les journées froides et ensoleillées, ils absorbent la chaleur solaire et la chaleur émise par la pièce et en rayonnent une partie dans leur environnement immédiat. Par temps chaud et ensoleillé, ils rejettent moins de chaleur solaire que les fenêtres réfléchissantes.

Vitrages sous vide

Les vitrages sous vide sont conçus pour offrir une meilleure performance thermique grâce à l'utilisation d'un vide pour empêcher toute déperdition calorifique par conduction ou par convection. Le Solar Energy Research Institute met au point un système utilisant une combinaison de différentes techniques de vitrage afin de produire un vitrage sous vide ayant une résistance thermique d'environ RSI 1,76 pour une épaisseur de 38 mm. Un vitrage sous vide serait constitué de deux vitres soudées au laser sur tous les bords pour assurer une parfaite étanchéité. Un vide serait maintenu entre ces vitres. Un enduit à très faible émissivité (moins de 0,1) serait appliqué sur la surface 2 du vitrage. Cette combinaison diminuerait considérablement la quantité de chaleur transmise à travers la fenêtre.[19]

Vitrage structural

Au début des années cinquante, l'extérieur de nombreux bâtiments de grande hauteur a changé radicalement. La conception des murs–rideaux en aluminium pour les bâtiments commerciaux a commencé à évoluer et de nouveaux systèmes de vitrage sont apparus. L'expérience a démontré que les façades en métal et en verre sont rentables et esthétiques, offrent un bon rendement énergétique et peuvent avoir une excellente tenue en service dans des conditions environnementales rigoureuses.[20]

La technique du vitrage structural est basée sur les produits d'étanchéité, qui servent non seulement à protéger le bâtiment des intempéries, mais aussi à transmettre les charges du vitrage à son support structural périmétrique (Figure 6).[21] Un produit d'étanchéité à module élevé tel que la silicone satisfait aux exigences de résistance, d'adhérence au verre et au métal, d'étanchéité aux intempéries et de facilité d'application.

Étant donné la complexité et les exigences particulières de la conception et de la construction des vitrages structuraux, il est essentiel que ces tâches ne soient confiées qu'à des professionnels et à des ouvriers spécialement formés à cette fin.

Vitrages structuraux types

Au cours des vingt dernières années, on a mis au point essentiellement trois types de systèmes de vitrages structuraux à la silicone : tout-verre, à deux côtés supportés et à quatre côtés supportés. Dans les trois systèmes, la silicone d'étanchéité a remplacé les anciennes méthodes de retenue à profilés ou feuillures.[22]

Le *système tout-verre* offre la plus grande translucidité (avec des meneaux porteurs en verre). Ce système peut convenir pour certaines applications comme les champs de course, les devantures de magasins, les salles d'exposition et les halls d'entrée (Figure 7).

Le *système à quatre côtés supportés* comprend un mur–rideau qui semble entièrement en verre de l'extérieur, mais les vitres sont portées de l'intérieur (Figure 8). Comme les murs–rideaux traditionnels, il incorpore des éléments horizontaux et verticaux continus mais sans les butées métalliques conventionnelles (c.-à-d. qu'il n'y a pas de profilé de support sur tout le pourtour).

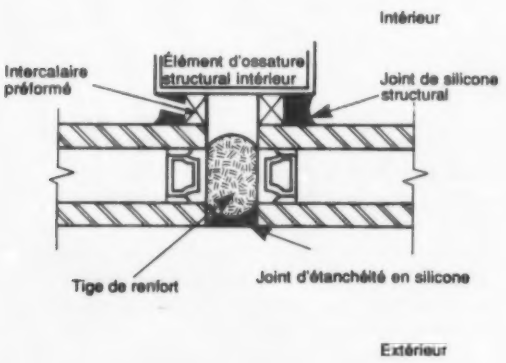


Figure 6. Double vitrage isolant structural, coupe d'un meneau vertical.

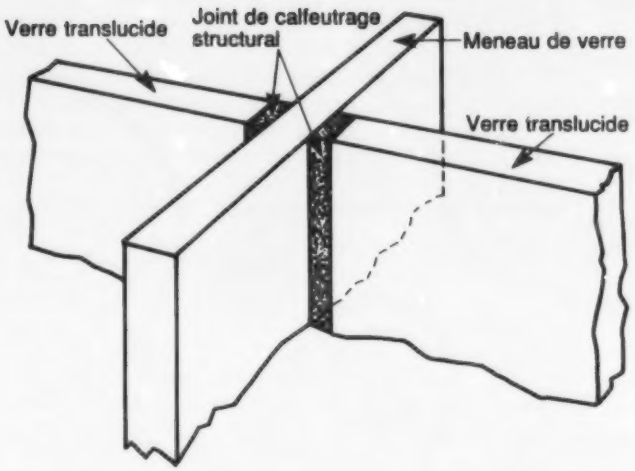


Figure 7. Système de vitrage structural tout-verre.

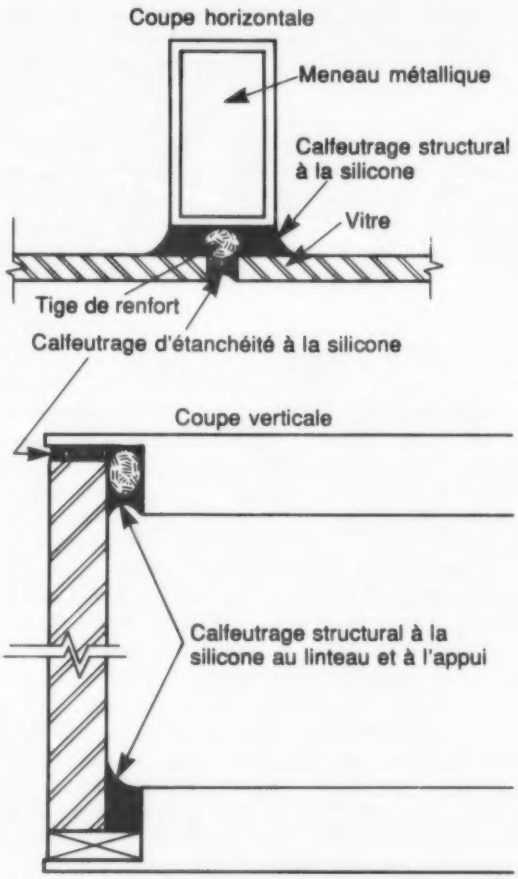


Figure 8. Système de vitrage structural à quatre côtés supportés.

Le *système à deux côtés supportés* semble entièrement composé de bandes de verre de l'extérieur, mais les vitres sont supportées sur deux côtés de l'intérieur (Figure 9).[23] Ce système de vitrage est semblable au vitrage ordinaire à joint bout à bout sauf qu'un meneau métallique est utilisé du côté intérieur du joint d'about vertical.

Il est essentiel de noter que les vitrages structuraux à étanchéité à la silicone, et spécialement les systèmes à quatre côtés supportés, demandent qu'on porte un soin particulier à la conception et à l'exécution des travaux. La température et l'humidité au moment de l'application et la propreté des surfaces sont extrêmement importantes, tout comme la stricte conformité aux instructions du fabricant tout au long de la mise en œuvre.

Lorsqu'il y a défaillance de ce type de vitrage, elle commence généralement par le produit d'étanchéité. Les principales causes de défaillance du produit d'étanchéité ne diffèrent pas, qu'il s'agisse de vitrages structuraux ou de toute autre application d'un produit d'étanchéité adhésif.

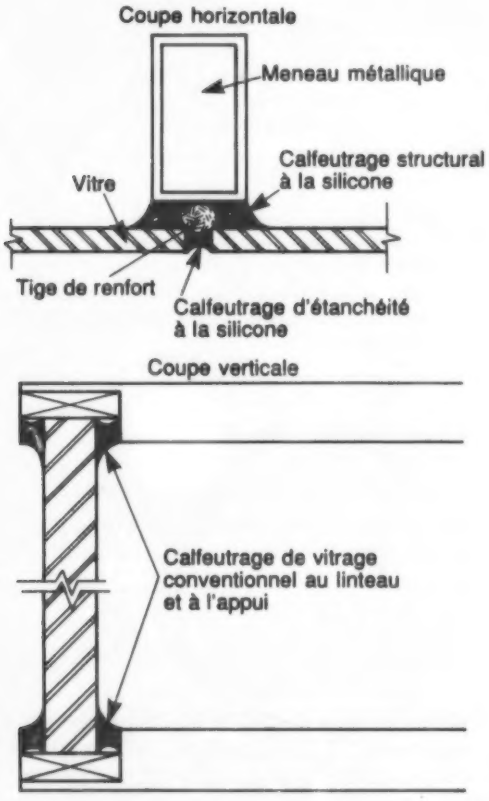


Figure 9. Système de vitrage structural à deux côtés supportés.

Différents fabricants offrent des programmes gratuits de formation et d'essai afin de promouvoir l'utilisation de ces nouvelles techniques de vitrage, qui sont de plus en plus en vogue dans le secteur des bâtiments commerciaux.

Principaux éléments

Les principaux éléments d'un système de vitrage structural sont les suivants : le dormant, le verre, le calfeutrage structural et les accessoires. À quelques exceptions près (ex. calfeutrages ayant des propriétés spéciales, meneaux de verre dans les systèmes tout-verre, et intercalaires de vitrages isolants), les principaux éléments sont semblables à ceux de la plupart des fenêtres et des murs–rideaux. Toutefois, il faut effectuer un contrôle de la qualité beaucoup plus rigoureux afin de s'assurer que toutes les conditions et recommandations des fabricants du calfeutrage et du vitrage sont satisfaites.

Les éléments de dormant structural sont spécifiés par les concepteurs, qui établissent des exigences de résistance similaires à celles imposées pour les murs–rideaux, dont la flèche est le facteur limitatif. En plus de répondre aux principes de calcul de base, le substrat doit être anticorrosion ou traité de façon que le calfeutrage y adhère solidement.[24]

La silicone est le seul produit connu possédant les caractéristiques de résistance structurale et d'étanchéité nécessaires aux vitrages tout-verre. Le type de calfeutrage à la silicone utilisé est un matériau à un composant qui durcit par hydratation et qui libère de l'acide acétique; ce type de calfeutrage est souvent appelé calfeutrage à durcissement par acide. Il se caractérise par sa facilité d'application, son excellente adhérence, sa grande flexibilité, sa durabilité à long terme et par un module pouvant répondre aux exigences structurales.

Dans l'analyse de la capacité structurale d'un calfeutrage à la silicone, il faut considérer deux propriétés distinctes et pourtant indissociables : la cohérence interne et la force d'adhérence ou adhésion. Ces deux propriétés sont essentielles pour que le calfeutrage assure sa fonction structurale.

Vitrage à intercalaire structural

La pénétration des vitrages structuraux à deux et à quatre côtés supportés à la silicone sur le marché américain du mur–rideau architectural est évaluée entre 25 et 40 pour 100.[25] Environ 75 pour 100 de ces vitrages sont à deux côtés supportés. La raison de la plus grande popularité de ce vitrage est que, malgré

l'apparence attrayante du vitrage à quatre côtés supportés, les propriétaires et les architectes s'inquiètent des conséquences d'une défaillance éventuelle de l'adhérence du joint de silicone.[26]

Un nouveau mode de construction a été conçu qui offre la même apparence en plus d'assurer une meilleure sécurité. Le produit est constitué d'un vitrage isolant comportant un profilé en U encastré sur tout le pourtour des vitres. Le vitrage peut ainsi être maintenu en place par des agrafes ou des crochets grâce à différentes techniques de vitrage. La Figure 10 illustre un intercalaire traditionnel et le nouvel intercalaire structural.

Il faut noter que, jusqu'ici, on ne dispose pas encore de données suffisantes pour évaluer la tenue en service de ce nouvel intercalaire structural. Il est mentionné dans le présent exposé à titre d'exemple d'innovation par rapport aux systèmes de vitrages structuraux décrits précédemment.

Matériaux

Depuis des années, on utilise l'aluminium et l'acier galvanisé pour la fabrication des intercalaires des vitrages isolants. Le bois, l'aluminium et le vinyle servent de matériaux de dormants. On tente maintenant d'améliorer les caractéristiques de rendement du vitrage et des dormants en utilisant des matériaux ou combinaisons de matériaux moins conducteurs de chaleur et plus durables que les matériaux traditionnels.

Matériaux de dormants

Des dormants en fibre de verre et de polyuréthane ont récemment été mis sur le marché. Des profilés de fibre de verre sont obtenus en liant des fibres dans une matrice de polyester. Le mélange est ensuite moulé par pultrusion (tiré dans une filière chauffée), la chaleur durcissant le matériau sous sa forme moulée. Les dormants en fibre de verre sont généralement disponibles dans tout un éventail de couleurs et les fabricants prétendent que leur matériau a une résistance supérieure et un coefficient de dilatation thermique inférieur à ceux du vinyle.

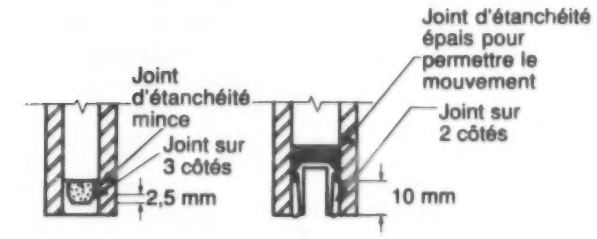


Figure 10. Comparaison d'intercalaires traditionnel et structural.

Les dormants de polyuréthane sont moulés sous différents formats. On prétend que ces éléments sont très résistants et ont un très faible coefficient de conductivité thermique. Malheureusement, on ne dispose pas de données expérimentales pour comparer les caractéristiques thermiques de ces types de dormants. Quoi qu'il en soit, on croit que la résistance à la condensation de la fibre de verre et du polyuréthane serait supérieure à celle de l'aluminium ou du vinyle.

Matériaux de vitrage

Comme nous l'avons mentionné précédemment, les intercalaires des vitrages isolants sont faits en aluminium ou en acier galvanisé. Puisque la conductivité thermique du métal est très élevée par rapport à celle du verre, les intercalaires métalliques forment des ponts thermiques autour du vitrage, ce qui cause des pertes de chaleur supérieures et une température inférieure du verre sur le périmètre de la vitre.

Des efforts considérables ont été déployés afin de réduire les déperditions calorifiques sur le pourtour des vitrages, ce qui a mené à la mise au point d'intercalaires en silicone. Le principal avantage de ce type d'intercalaire est qu'il réduit ou élimine le contact entre le métal et le verre, ce qui diminue les pertes de chaleur par les bords des vitrages isolants et en améliore du même coup la performance thermique.

Nouveaux concepts de fenêtres

La tenue des fenêtres peut être améliorée grâce à de nouveaux concepts et à des matériaux perfectionnés. La présente section décrit quelques nouveaux concepts de fenêtres.

Fenêtres ventilées

Les fenêtres ventilées ou à circulation d'air sont des fenêtres permettant à l'air de circuler entre les vitres. L'intérêt pour les fenêtres ventilées est né du souci d'améliorer le rendement thermique des fenêtres et le renouvellement d'air dans les bâtiments. Une fenêtre ventilée est généralement constituée d'un double vitrage

isolant et d'une vitre ajoutée à l'extérieur. L'air peut circuler entre le double vitrage isolant et la vitre ajoutée.

Il existe deux types de fenêtres ventilées : la fenêtre d'extraction et la fenêtre d'alimentation en air (Figure 11). Dans le cas d'une fenêtre d'extraction, l'air intérieur est poussé entre les vitres et est ensuite évacué à l'extérieur. Pendant la saison de chauffage, l'air chaud de l'intérieur transmettrait une partie de sa chaleur à la fenêtre, réduisant l'écart de température entre les vitres intérieures et, par conséquent, réduisant les pertes de chaleur. Par temps chaud, une fenêtre d'extraction évacuerait la chaleur solaire pénétrant par la fenêtre et diminuerait la charge de refroidissement. Des stores peuvent être installés entre les vitres pour augmenter l'évacuation de chaleur solaire.[27,28]

Les fenêtres d'alimentation en air aspirent l'air extérieur et l'injectent dans le bâtiment. Pendant la saison de chauffage, l'air froid circule sur les vitres intérieures et est chauffé par la fenêtre et par le soleil avant d'être injecté dans le bâtiment. Le réchauffage de l'air extérieur tend à réduire la charge de chauffage. Il a été démontré que l'augmentation moyenne de température de l'air à l'intérieur de la fenêtre est d'environ 50 pour 100 de l'écart entre les températures intérieure et extérieure.[29] Malheureusement, la fenêtre d'alimentation en air pose certains problèmes techniques. La prise d'air dans le but d'utiliser la chaleur des fenêtres n'est pas économique. Le principal problème est que l'air frais est introduit par petites quantités en de nombreux endroits. La combinaison d'une fenêtre d'alimentation en air et d'une prise d'air commandée en fonction de l'humidité pourrait être une solution.[30]

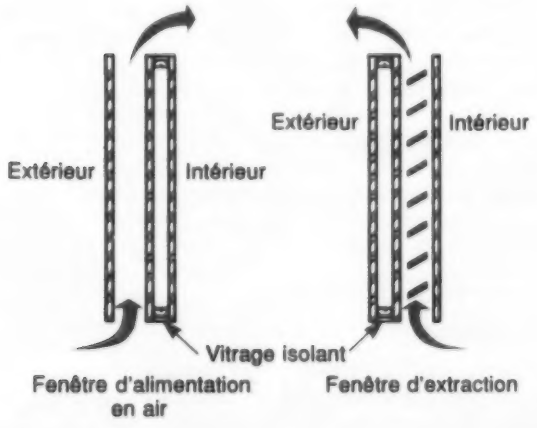


Figure 11. Fenêtres ventilées.

Tubes capillaires

Les vitrages isolants sont toujours exposés à des variations de pression et de température. Les changements de pression peuvent être le résultat de variations de pression barométrique, d'altitude ou de température. Les augmentations de pression et les chutes de température font bomber les vitrages isolants vers l'intérieur (concavité) alors que les diminutions de pression et les augmentations de température les font bomber vers l'extérieur (convexité) (Figure 12). Ce bombement produit une distorsion visuelle et peut causer la fracture du verre. Ces mouvements continus peuvent mener à une défaillance prématurée des joints de bordure en raison des contraintes supplémentaires qui leur sont imposées. Les facteurs déterminant le fléchissement du verre et l'ampleur des contraintes sont l'épaisseur du verre, l'épaisseur de la lame d'air et le rapport hauteur–largeur du vitrage.

L'un des moyens utilisés pour pallier ces changements continus de pression consiste à laisser la pression à l'intérieur du vitrage isolant s'équilibrer avec la pression atmosphérique. Par le passé, les fabricants ont installé des tubes métalliques (tubes reniflards) d'environ 75 mm de longueur et 3 mm de diamètre pour compenser les changements d'altitude ou de température pendant le transport. Ces tubes étaient obturés par sertissage sur le chantier. Afin de réduire au minimum les effets des variations de pression, certains fabricants ont commencé à insérer dans les vitrages isolants des tubes qui peuvent être laissés ouverts (tubes capillaires).

Figure 12. Fléchissement du vitrage isolant dû aux variations de pression et de température.

Ces tubes d'acier inoxydable ont environ 300 mm de longueur et 0,5 mm de diamètre.

Il a été démontré que les tubes capillaires réduisent les différences de pression entre l'atmosphère et un vitrage isolant, contribuant ainsi à diminuer le fléchissement des vitres.[31] Toutefois, il est bon de noter que les fenêtres avec tubes capillaires ne sont pas réglementées par la norme ONGC sur les vitrages isolants.[32]

Fenêtres protégées par des extincteurs automatiques

Les attributs attrayants du vitrage se reflètent dans l'utilisation grandissante du verre dans les bâtiments. Toutefois, le comportement général des vitrages dans un incendie est généralement mauvais. Des vitres ordinaires peuvent briser en éclats après seulement quelques minutes d'exposition au feu. Une isolation active contre le feu peut être réalisable par l'installation d'extincteurs automatiques à eau bien conçus et bien placés du côté exposé au feu de la cloison.[33] Dans des salles d'un hôpital donnant sur un atrium, on a pu réaliser une séparation coupe-feu de 2 heures en installant des têtes d'extincteur au-dessus d'une fenêtre fixe à dormant d'aluminium.[34] Dans chaque cas, l'installation doit être adaptée pour offrir une résistance au feu équivalente.

Le risque de propagation verticale du feu par une baie de fenêtre peut être réduit grâce à des saillies éloignant les flammes du bâtiment.[35] Toutefois, le bâtiment devient alors plus dangereux pour le bâtiment voisin et les distances par rapport aux limites de propriété doivent être réajustées en conséquence.

Applications de l'ordinateur

Les fenêtres et les applications de l'ordinateur sont étroitement liées depuis un certain nombre d'années. À mesure que de nouveaux matériaux et de nouveaux concepts de fenêtres apparaissent, on peut en évaluer la tenue grâce à des modèles informatiques. L'amélioration de la modélisation informatique permet la conception d'innovations plus intéressantes et plus variées.

Modèles de prédiction

L'introduction de nouveaux matériaux, concepts et configurations a compliqué l'évaluation de la performance des fenêtres. Il est devenu de plus en plus difficile et coûteux de tester des combinaisons complexes de nouveaux concepts de fenêtres. La mise en œuvre de plusieurs modèles de prédiction utilisables sur des ordinateurs personnels permet aux concepteurs de prédire la performance et les économies réalisables avec les nouveaux concepts proposés. Des programmes comme VISION[12] et WINDOW 3.0[36] calculent les caractéristiques de transfert thermique des fenêtres comme la résistance thermique globale et le facteur d'ombrage. Des paramètres comme l'épaisseur de la lame d'air, la transmission de rayonnement infrarouge, l'émissivité des surfaces, la transmittance et la réflectance solaires, les gaz dans la lame d'air, le nombre de vitres et les effets de différentes conditions environnementales peuvent être facilement analysés grâce aux modèles informatiques. Un programme appelé FRAME évalue la performance thermique des systèmes de dormants de fenêtres et peut tenir compte de nombreuses combinaisons de matériaux et de techniques de construction pour des fenêtres rectangulaires.[37] Des programmes sophistiqués comme ceux-ci peuvent servir à prédire la performance des nouveaux types de fenêtres proposés. Ces prédictions peuvent ensuite être utilisées dans des modèles informatisés d'évaluation du rendement énergétique des bâtiments comme SOLAR-5 afin de prédire l'effet de la performance des fenêtres sur les coûts.[38]

Systèmes experts

Les perfectionnements dans la technologie des logiciels au cours des dix dernières années ont permis le développement de la conception assistée par ordinateur (CAO) et l'émergence des systèmes experts, qui peuvent tous deux être utiles à la sélection et à la conception des fenêtres.

Un système appelé WINDEKS utilise la technologie des systèmes experts pour diagnostiquer les défaillances de fenêtres.[39] Le système peut actuellement identifier les problèmes de condensation sur les fenêtres conventionnelles et proposer des solutions possibles. Ce programme a d'abord été conçu pour démontrer l'utilité des systèmes experts sur un sujet d'intérêt pour la plupart des propriétaires de bâtiments. Il a depuis servi d'outil de diagnostic pour les experts-conseils et les services d'information.

Conclusion

L'industrie de la fenêtre a connu une transformation révolutionnaire au cours des vingt dernières années.

Des découvertes dans les domaines de la physique et du génie ont été à la source de nombreuses améliorations dans la conception, la performance et la

construction des fenêtres. L'avènement d'enduits à faible émissivité appliqués sur le verre ou sur de minces films plastiques, de gaz autres que l'air dans la cavité entre les vitres et de vitrages isolants sous vide a mené à la fabrication de fenêtres à très haute performance.

Les dormants et intercalaires des fenêtres ne sont plus limités aux matériaux traditionnels. Le vinyle, le polyuréthane, la fibre de verre et la silicone sont maintenant utilisés dans la construction de fenêtres plus durables, plus résistantes et à meilleure performance.

Les produits d'étanchéité à la silicone incorporés aux vitrages structuraux ont changé l'apparence de certains bâtiments et ont contribué à l'économie d'énergie en réduisant les pertes de chaleur par l'enveloppe du bâtiment.

Les modèles informatiques permettant de prédire la performance des fenêtres sont des outils utiles à la conception, à la fabrication et au choix des fenêtres.

Par ailleurs, l'industrie de la fenêtre aura à relever certains défis afin de maintenir un taux de croissance raisonnable dans un marché très compétitif. Il faudra réviser les normes existantes pour refléter les plus récents développements dans la conception et la fabrication des fenêtres. C'est là une précaution essentielle pour assurer la protection des consommateurs et des fabricants de fenêtres. Il faudra simplifier l'information afin que l'installateur puisse prendre les bonnes décisions. De plus, les consommateurs en savent de plus en plus sur les fenêtres et leurs caractéristiques. Il serait avantageux pour l'industrie de faire appel à la nouvelle technologie pour satisfaire les besoins des consommateurs à un prix raisonnable.

Références

1. Selkowitz, S.F., *Thermal Performance of Insulating Window Systems*, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, Berkeley, Californie, 1979, LBL–8835.
2. Chahroudi, D., *The Future of High-Performance Glazing*, Solar Age, février 1986, p. 21–26.
3. Owens, P.G.T., *Low Emissivity Coatings on Glass in Windows*, Building Control, septembre–octobre 1985, p. 42–45.
4. Swanson, J.G., *What is the Outlook for Low-E Glass?* Glass Digest, mai 1986, p. 60–64.
5. Valdes, N., *How Much Do You Know About Low-E?* Glass Digest, février 1987, p. 97–100.
6. Vossen, J.L., *Transparent Conducting Films*, The Physics of Thin Films, vol. 9, Academic Press, New York, 1977, p. 1–71.
7. Lampert, C.M., *Heat Mirror Coatings for Energy Conserving Windows*, Solar Energy Materials, vol. 6, North Holland Publishing Company, 1981, p. 1–41.
8. Elmahdy, A.H. et R.P. Bowen, *Laboratory Determination of the Thermal Resistance of Glazing Units*, À paraître dans ASHRAE Transactions, vol. 94, partie 2, 1988.
9. Gerner, J., *A Revolution in Glazing*, Solar Age, août 1985, p. 18–20.
10. Glover, M., *Super Window Technology and Performance Testing*, Séminaire sur la technologie des superfenêtres, parrainé par ÉMR et tenu à Toronto le 5 novembre 1986.
11. Sabatiuk, P.A., *Review of Gas Filled Window Technology: Summary Report*, Proceedings of ASHRAE/DOE Conference, Thermal Performance of the Exterior of Envelopes of Buildings II, ASHRAE Special Publication No. 38, 1982, p. 643–653.
12. Ferguson, J.E. et J.L. Wright, *Computer Simulation of the Thermal Performance of Super Windows*, Rapport final établi pour le Programme de l'énergie solaire, Conseil national de recherches du Canada, Ottawa, n° de dossier DSS 04SX.31926–3–0115, juin 1984.
13. Breder, K., *Summary of Discussion Session DS2.3. Coatings, Gas Filled Units, Movable Insulation, etc.*, Proceedings of Windows in Building Design and Maintenance, Conference Swedish Council for Building Research, D1:1987, p. 113–114.
14. Gerner, J., *Update on the Future Glazings*, Solar Age, août 1985, p. 25.
15. Hunt, A.J., *Microporous Transparent Materials for Insulating Windows and Building Applications*, Assessment Report for Solar Energy Group, University of California, Berkeley, Californie, LBL–15306, 1982.
16. Rubin, M. et C.M. Lampert, *Transparent Silica Aerogels for Window Insulation*, Solar Energy Materials, vol. 7, North Holland Publishing, 1983, p. 393–400.
17. Schmidt, W.J., *The Preparation and Properties of Acid Catalysed Silica Aerogel*, Thèse de M.Sc., départ. de génie chimique, University of Wisconsin, Madison, Wisconsin, 1982.
18. Fricke, J., *Aerogels*, Scientific American, vol. 258, n° 5, mai 1988, p. 92–97.
19. Moore, S.W. et R.D. McFarland, *Material Aspects Of Solar Energy Use in Buildings*, LA–UR–84–1428, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, Nouveau-Mexique, 1984.
20. Spindler, R.G., *Architectural Glazing Practices – The Materials, Techniques, and Potential Problems*, ASTM Standardization News, septembre 1985, p. 43–48.
21. *Silicone Construction Sealants in Structural Glazing Systems*, Silicone Sealant Design Guide No. 4, General Electric, Publication No. CDS–1963A Rev. 7/81.
22. Jeffery, T., *Straight Talk on Structural Glazing*, Glass Digest, août 1987, p. 117–119.
23. Banks, G., *Specifying Structural Glazing*, Canadian Architect, mai 1985, p. 44–51.
24. Hilliard, J.R., C.J. Parise, et C.O. Peterson fils, *Structural Sealant Glazing*, Sealant Technology in Glazing Systems, American Society for Testing and Materials, ASTM STP 638, 1977, p. 67–99.
25. Swanson, J.G., *Structural Glazing Continues to Grow in the Market Place*, Glass Digest, août 1987, p. 108–114.
26. Francis, G.V., *Innovations in Structural Glazing*, Proceedings of Fourth Conference on Building Science and Technology, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, 1988, p. 75–99.
27. Chapman, W.F., *Less Refrigeration, More Glass: A Compatible Idea?* ASHRAE Journal, février 1979, p. 31–33.
28. Sodergren, D. et T. Bostrom, *Ventilation with the Exhaust Air Window*, ASHRAE Journal, avril 1971, p. 51–57.
29. Barakat, S.A., *Thermal Performance of a Supply Air Window*, Proceedings of 12th Annual Passive Solar Conference, American Solar Energy Society, Inc., Portland, Oregon, 1987, p. 152–158.
30. Yuill, G.K., *Laminar Air Flow Super Window*, Établi pour la Direction des énergies renouvelables, Énergie, Mines et Ressources Canada, n° de dossier 6179, DD#71, 1987.
31. Scherrer, M.J. et J. Sheldon, *How to Alleviate Pressure Build-Up By Using Capillary Breather Tubes for Insulating Glass*, U.S. Glass, Metal & Glazing, vol. 19, n° 3, 1985, p. 40–46.
32. *Panneaux isolants en verre*, Office des normes générales du Canada, Ottawa, Ontario, CAN–12.8–M76, 1976.
33. Kim, A.K., *Fire Exposure of Glazing*, Proceedings of Fourth Conference on Building Science and Technology, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, 1988, p. 14–30.

34. Boehmer, D.J., *Fire Spread Within and Between Buildings – A Role for Protected Glazing*, Proceedings of Fourth Conference on Building Science and Technology, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, 1988, p. 31–43.
35. Yung, D. et I. Oleszkiewicz, *Fire Spread via Exterior Walls of Buildings*, Proceedings of Fourth Conference on Building Science and Technology, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, 1988, p. 2–12.
36. *Window 3.0, A Computer Program for Calculating Window Thermal and Optical Properties, User Guide*, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, Berkeley, California, 1987.
37. *A Finite Difference Computer Program To Evaluate Thermal Performance of Window Frame Systems*, Final Report Version 1.0, Enermodal Engineering Ltd., Waterloo, Ontario, 1988.
38. Rush, R., *Refining Window Energy Performance*, Building Design & Construction, décembre 1987, p. 148–152.
39. Ruberg, K. et S.M. Cornick, *Diagnosing Window Problems: Building an Expert System*, Proceedings of Fourth Conference on Building Science and Technology, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, 1988, p. 101–121.